И. А. Никольский

Квантовые усилители





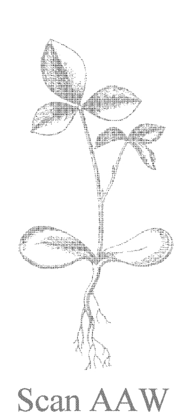
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 532

И. А. НИКОЛЬСКИЙ

КВАНТОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО „ЭНЕРГИЯ"

МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД

УДК 621.378. 5
Н64

Излагаются в популярной форме общие принципы действия, устройство и основные характеристики квантовых усилителей сверхвысоких частот на твердом теле, а также особенности использования этих усилителей в радиотехнической аппаратуре. Рассматриваются преимущества квантовых усилителей, перспективы их развития и применения.

Предназначается для подготовленных радиолюбителей, техников, инженеров и широкого круга лиц, которых интересует квантовая электроника.

Никольский Игорь Александрович
Квантовые усилители. М.—Л., издательство „Энергия", 1964.
64 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 532).
Тематический план 1964 г., № 345

* * *

Редактор *И. А. Болошин* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в пр-во 17/II 1964 г. Подписано к печ. 30/IV 1964 г.
Формат бумаги 84×108 1/32 3,28 п. л. 4,5 уч.-изд. л.
Т-04304 Тираж 52 000 экз. Цена 18 коп. Зак. 1086

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Потребности практики, связанные с выдающимися научно-техническими достижениями человечества, и особенно советского народа, в освоении космического пространства, все более широким внедрением радиоэлектронных приборов и методов во все отрасли промышленности, научные исследования, культуру, жизнь и быт людей, выдвигают перед радиоэлектроникой новые и все более сложные задачи.

Технический уровень и возможности радиоэлектронных приборов и аппаратуры, основанных на принципах классической радиоэлектроники (использование электронных потоков и колебательных цепей), не удовлетворяют многим современным требованиям и не позволяют решать задачи, которые ставятся практикой перед учеными и инженерами. Решение новых задач и повышенные требования к радиоэлектронной аппаратуре заставляют ученых все чаще отходить от методов классической радиоэлектроники, искать пути создания устройств и приборов, основанных на новых принципах, использующих новые физические методы, явления и материалы.

В последние годы такие пути были найдены; в радиоэлектронике появились новые направления — молекулярная[1] и квантовая электроника. Эти направления основаны на использовании свойств твердого тела, эффектов взаимодействия молекул, атомов и связанных электронов твердых, газообразных и жидких веществ с электромагнитным полем.

Квантовая электроника открывает большие возможности для расширения границ используемых частот электромагнитного спектра, получения исключительно стабильных колебаний и усиления чрезвычайно слабых радиосигналов Особо следует отметить создание когерентных (согласованных) монохроматических источников света — оптических квантовых генераторов (лазеров). Такие генераторы позволяют начать освоение оптического диапазона для передачи и приема информации (только в диапазоне видимого света может быть размещено несколько миллионов телевизионных каналов) и предвещают коренные изменения

[1] Молекулярная электроника занимается использованием групп молекул (атомов) полупроводниковых материалов в качестве функциональных радиоэлектронных схем, узлов и блоков радиосистем. Молектронное устройство, представляющее собой полупроводниковый монокристалл размером в несколько миллиметров, может заменить целые усилительные или другие схемы на лампах или обычных полупроводниковых приборах.

в технике связи и локации. Большое будущее принадлежит этим квантовым приборам в радиоастрономии, физике, точном приборостроении, медицине и других областях науки и техники.

Почему указанную новую область радиоэлектроники называют квантовой электроникой, а приборы квантовыми или квантово-механическими?

Как известно, все электромагнитные колебания, в том числе свет, поглощаются и излучаются отдельными порциями-квантами Представление о прерывном характере излучения и поглощения света веществом определенными порциями — квантами было введено в 1900 г немецким физиком Максом Планком. Энергия кванта равна $E=hf$, где f — частота излучения, h — постоянная Планка ($h=6{,}62\cdot10^{-34}$ *дж·сек*) В 1905 г. Альбертом Эйнштейном была создана квантовая теория света. В 1911—1913 гг. датский физик Нильс Бор установил, что внутренняя энергия атома квантована и может изменяться только дискретными порциями, иначе говоря, атом представляет собой квантовую систему с вполне определенным набором энергетических состояний Переход квантовой системы из одного энергетического состояния в другое сопровождается излучением или поглощением кванта электромагнитной энергии hf.

Квантовая система под воздействием внешнего электромагнитного поля, как было установлено А. Эйнштейном в 1917 г., может излучить квант энергии и перейти в состояние с меньшей энергией Этот эффект, получивший название и н д у ц и р о в а н н о г о и з л у ч е н и я, лежит в основе работы целого ряда квантовых приборов и, в частности, квантовых генераторов и усилителей.

Можно сказать, что квантовая электроника используется уже десятилетиями Хорошо известные электронные устройства, фотоэлементы, некоторые полупроводниковые приборы фактически являются квантовыми устройствами.

Впервые возможность создания квантовой системы, способной отдавать энергию электромагнитной волне была обоснована В. А. Фабрикантом в 1939 г. Экспериментально возможность получения индуцированного излучения была установлена только в 1950 г. Пэрселом и Паундом в США. Особенно важным для становления квантовой электроники явилось открытие в 40-х годах ядерного магнитного резонанса и открытие в 1944 г. советским физиком Е. К. Завойским явления электронного парамагнитного резонанса.

В 1951—1952 гг Н. Г. Басовым и А. М Прохоровым и в 1953 г. Вебером в США была обоснована возможность создания молекулярного усилителя и генератора радиоволн. В 1954 г. в Физическом институте им. П Н. Лебедева Н. Г Басов и А М Прохоров и в Колумбийском университете (США) Ч Таунс, Дж. Гордон и Цайгер разработали первые действующие квантовые генераторы — молекулярные генераторы на пучке молекул аммиака В том же году был разработан в США (Гарвардский университет) и в Англии (Национальная физическая лаборатория) атомный стандарт частоты на пучке атомов цезия.

Н. Г. Басов и А. М Прохоров в 1955 г. предложили так называемый «трехуровневый метод» создания активных квантовых систем и Бломберген в 1956 г. (США) предложил использо-

вать для таких трехуровневых усилителей парамагнитные кристаллы при температуре жидкого гелия (4,2° К). В 1955—1956 гг. Таунс и др. в США провели теоретическое исследование квантовых парамагнитных усилителей (КПУ) на твердом теле Первый действующий квантовый трехуровневый парамагнитный усилитель был построен в 1957 г. в США Сковилом и др.

В 1957 г. Н. Г Басов, Б М Вул и Ю М Попов исследовали возможность создания квантовых генераторов инфракрасного диапазона на полупроводниках. К концу 1960 г. ряд фирм США разработал несколько конструкций импульсных оптических квантовых генераторов на различных твердых и газообразных материалах с возбуждением от некогерентных источников света Позднее были созданы также квантовые генераторы, работающие в непрерывном режиме.

Таковы основные вехи развития квантовой электроники Отметим, что важнейшие идеи, положившие начало успешному развитию этой новой области радиоэлектроники, были высказаны советскими учеными. За работы в области квантовой электроники Н. Г. Басову и А М Прохорову в 1959 г. была присуждена Ленинская премия

Появление и развитие квантовой электроники является крупнейшим достижением науки и техники и, в частности, качественным скачком в технике генерации и приема электромагнитных колебаний. Квантовые приборы считаются весьма перспективными во многих областях радиоэлектроники, и им принадлежит большое будущее. Президент Академии наук СССР акад. М. В. Келдыш в своем выступлении на ноябрьском Пленуме ЦК КПСС в 1962 г. отметил, что революционный переворот в различных областях науки и техники, вызванный квантовой электроникой, будет не менее важным, чем переворот, вызванный полупроводниковой техникой.

Следует иметь в виду, что, как показывает ход развития радиоэлектроники, освоение новых диапазонов волн и появление устройств, основанных на новых принципах, не влечет за собой полного отказа от применения аппаратуры и приборов старых диапазонов, основанных на старых принципах. Очевидно, такие приборы, как оптические квантовые генераторы и квантовые парамагнитные усилители, будут использоваться наряду с ранее разработанными приборами и аппаратурой, которые будут применяться там, где их использование более целесообразно по сравнению с новыми устройствами

Исследования в области квантовой электроники хотя пока еще в целом и находятся в начале своего развития, но уже вышли из стадии лабораторных работ. Многие из квантовых приборов получили практическое применение в действующей радиоэлектронной аппаратуре Это относится прежде всего к квантовым парамагнитным усилителям СВЧ, принципы работы, устройство и вопросы использования которых рассматриваются в данной брошюре.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ КВАНТОВЫХ ПРИБОРОВ

1. СВЕДЕНИЯ О КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

Для увеличения дальности действия радиотехнических средств, использующих диапазон СВЧ (радиорелейные линии связи, телевизионные станции, радионавигационные системы, радиолокационные станции, линии телеуправления и др.), наряду с увеличением мощности передатчиков стремятся повышать чувствительность приемных устройств, т. е. создавать приемники, которые регистрировали бы все более слабые сигналы Создание приемников с предельно высокой чувствительностью чрезвычайно трудная задача, и в диапазоне СВЧ, до появления квантовых усилителей, эта задача представлялась неразрешимой.

В радиотехнических схемах современных приемных устройств применяются электронные лампы, полупроводниковые приборы, различные радиодетали (сопротивления, конденсаторы, переключатели и т. п.) и соединительные провода. Из-за хаотического теплового движения электронов в элементах радиотехнических схем возникают случайные колебания токов, которые, усиливаясь в приемнике, образуют собственный шум на его выходе. Под уровнем собственных или внутренних шумов приемника понимается полная мощность шумов приемного устройства, включая антенну, отнесенная к его входу (при отсутствии сигнала). Если принимаемый полезный сигнал на входе приемника слабее собственного шума приемника, то при любой степени усиления полезного сигнала без применения специальных методов его невозможно будет выделить на фоне шумов; сигнал потонет, потеряется в шумах. Таким образом, отношение сигнала к шуму на выходе приемного устройства определяет качество этого приемника; чем больше будет это отношение, тем больше уверенности в выделении полезного сигнала из шумов.

Для усиления СВЧ могут применяться различные типы ламп. На частотах меньше 75 *Мгц* используются обычные пентоды, на частотах до 500 *Мгц* применяются специальные пентоды, а в диапазоне 500—3 000 *Мгц* используются дисковые триоды, клистроны или лампы бегущей волны С повышением частоты шумовые (и усилительные) свойства обычных ламп (триодов, пентодов) резко ухудшаются Поэтому приемники СВЧ уже в сантиметро-

вом диапазоне часто не имели усилителя высокой частоты, после входного устройства использовался преобразователь частоты. В современных приемниках СВЧ, как правило, имеется усилитель высокой частоты. В качестве такого усилителя в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн применяются чаще всего лампы бегущей волны. В последнее время в качестве малошумящих усилителей высокой частоты стали применять также полупроводниковые параметрические усилители.

Собственный шум приемника состоит из шума всех его элементов. Шумы первых каскадов усилителя приемника усиливаются во всех последующих каскадах. Поэтому особое значение имеет величина собственных шумов первых каскадов усилителя высокой частоты приемного устройства и особенно первого (входного) каскада.

Принцип действия электронных ламп, как и всех других электронных приборов основан на взаимодействии электромагнитного поля с электронным потоком. В этих приборах кинетическая энергия заряженных частиц — электронов, полученная за счет источника питания, преобразовывается, хотя и частично, в энергию высокочастотного электромагнитного поля. Электронные потоки и являются основным источником собственных шумов ламп и всего приемника. Шумы электронных ламп вызываются главным образом флуктуациями электронного потока. Одной из причин этих флуктуаций является дробовой эффект, обусловленный неравномерным, хаотическим вылетом электронов из катода. Часть электронов, кроме того, захватывается положительно заряженными электродами лампы, что также приводит к изменению электронного потока внутри лампы по плотности и скорости.

В отличие от привычных нам электронных приборов (усилительных, смесительных и других ламп), в квантовых приборах происходит превращение внутренней избыточной энергии микрочастиц вещества (молекул, ионов, атомов, электронов) в энергию высокочастотного электромагнитного поля. Эта избыточная энергия приобретается частицами от дополнительного источника. Такими частицами, как мы убедимся в дальнейшем, могут быть и нейтральные в целом молекулы, парамагнитные ионы некоторых кристаллов и электроны в атомах. Таким образом, в квантовых приборах отсутствует электронный поток, благодаря чему эти приборы не имеют источников собственных шумов, обусловленных изменениями электронных потоков, и могут работать на сколь угодно высоких частотах, поскольку отсутствуют ограничения, вызываемые инерционностью электронов.

Итак, в квантовых приборах используется высвобождающаяся внутренняя энергия микрочастиц вещества, приобретенная ими от отдельного источника. Для уяснения принципов работы таких приборов познакомимся кратко с некоторыми свойствами микромира — свойствами квантовых систем. Под квантовой системой мы будем понимать такую систему, в которой элементарные частицы взаимодействуют между собой. В этом случае свойства всей системы и отдельных ее частей зависят от взаимного движения, связей и характера взаимодействия элементов этой системы.

В микромире при движении и взаимодействии микрочастиц действуют особые законы, многие из хорошо известных нам законов классической физики здесь неприменимы Движение микрочастиц подчиняется законам квантовой механики. Одной из существенных черт микромира является д и с к р е т н о с т ь свойств и взаимодействий. Дискретность присуща как атомно-молекулярным системам, так и элементарным частицам. Каждая частица или атом (молекула) может находиться лишь в определенных стационарных состояниях, образующих прерывный ряд. В таких стационарных состояниях атом имеет, например, определенные дискретные значения внутренней энергии и момента количества движения.

Квантовые системы — молекулы, атомы, ионы и др., а также составляющие их частицы совершают различные вращательные и колебательные движения, т. е. обладают некоторым запасом энергии В стационарных состояниях энергия квантовой системы или частицы остается постоянной. Значения энергии, которые может принимать квантовая система, называются э н е р г е т и ч е с к и м и у р о в н я м и Внутренняя энергия, которой обладают квантовые системы и частицы, соответствует определенному движению и взаимной ориентации и связям частиц — элементов системы. Заметим, что если частица (молекула, атом, электрон) свободно перемещается в пространстве как одно целое, то энергия этой частицы может принимать любые значения.

В повседневной жизни, когда мы встречаемся с большими телами, изменение энергии, а также изменение других величин, характеризующих состояние этих тел, например массы, скорости, может происходить практически непрерывно, т. е. существуют произвольные промежуточные значения этих величин. Переход же квантовой системы (частицы) из одного энергетического состояния в другое происходит скачком, минуя промежуточные состояния. Внутренняя энергия квантовых систем или частиц может изменяться под воздействием различных факторов; нас будет интересовать главным образом изменение внутренней энергии квантовых систем под воздействием электромагнитного поля

Под действием электромагнитного поля возможно увеличение или уменьшение внутренней энергии системы. В результате перехода системы из одного энергетического состояния в другое происходит излучение или поглощение квантов строго определенной частоты, зависящей от разности энергий состояний. Квантовая система, например атом, может поглотить (или излучить) только порцию энергии, которая равна разности возможных энергий двух его состояний. Поглотив порцию внешнего электромагнитного поля, частица переходит на более высокий, верхний энергетический уровень (она, как говорят, возбуждается). Под воздействием внешнего поля частица может также излучить порцию энергии и перейти на нижний энергетический уровень с меньшей по отношению к первоначальному состоянию энергией.

Таким образом, обмен энергией между внешним электромагнитным полем и квантовой системой (частицей) происходит дискретными порциями—квантами. Величина изменения внутренней

энергии связана с частотой внешнего поля уже приводившимся соотношением, называемым частотным условием Бора (рис. 1):

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf_{1,2},$$

где h — постоянная Планка;

$f_{1,2}$ — частота излучения между переходами *1* и *2*.

Частота излучаемой или поглощаемой энергии прямо пропорциональна разности энергетических уровней. Таким образом, чтобы происходил обмен энергией между квантовой системой и электромагнитным полем, т. е. чтобы возможно было поглощение или излучение кванта энергии, частота внешнего поля должна точно соответствовать частоте перехода между возможными уровнями энергии в системе. Условие частот Бора выражает закон сохранения энергии. Однако выполнения одного этого условия недостаточно для того, чтобы происходил обмен энергией между системой и полем. Должны выполняться и некоторые другие закономерности, составляющие все вместе «правила отбора»— правила, отбирающие от числа всех мыслимых переходов только реализующиеся в действительности Величина интервала ΔE между уровнями энергии зависит от внутреннего строения квантовой системы, а также от состояния, в котором находится эта система под влиянием внешних воздействий.

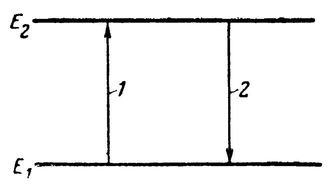


Рис. 1. Квантовая система с двумя энергетическими уровнями.

1 — поглощение; *2* — излучение

Излучение или поглощение веществом электромагнитных волн той или иной длины связано с различным характером движения микросистем или входящих в них частиц. Так, например, излучение или поглощение электромагнитной энергии в оптическом диапазоне видимого света обусловлено орбитальными переходами электронов, излучение в инфракрасном диапазоне вызывается изменениями энергии колебаний атомов в молекуле, а излучение и поглощение, лежащие в диапазоне СВЧ, связано чаще всего с изменением вращательной энергии молекул и энергии ионов в парамагнитных кристаллах.

При решении практических задач приходится иметь дело не с изолированной квантовой системой, отдельной молекулой, атомом или электроном, а с очень большим числом таких систем, поскольку эффект взаимодействия изолированной системы, частицы с электромагнитным полем был бы чрезвычайно слабым. Рассматривая процессы, в которых участвует большое число одинаковых микросистем, нельзя не учитывать их взаимного влияния, а также влияния внешних сил Вследствие взаимодействия между собой квантовых систем-молекул, атомов, ионов, а также под влиянием теплового хаотического движения энергетические уровни образца вещества изменяются. Появляются отдельные области возможных энергетических состояний. При этом становится возможным поглощение и излучение электромагнитных колебаний в некоторой полосе частот, соответствующей энергетическим

переходам между этими областями. Таким образом образуется спектр с линиями конечной ширины. С повышением температуры ширина спектральных линий веществ увеличивается, так как усиливаются движение и взаимодействие частиц. Так, понижение давления у газов приводит к сужению ширины спектральной линии. Ширина спектральных линий газов при небольших давлениях почти всегда у́же, чем у твердых тел, так как у газов взаимодействие между частицами более слабое

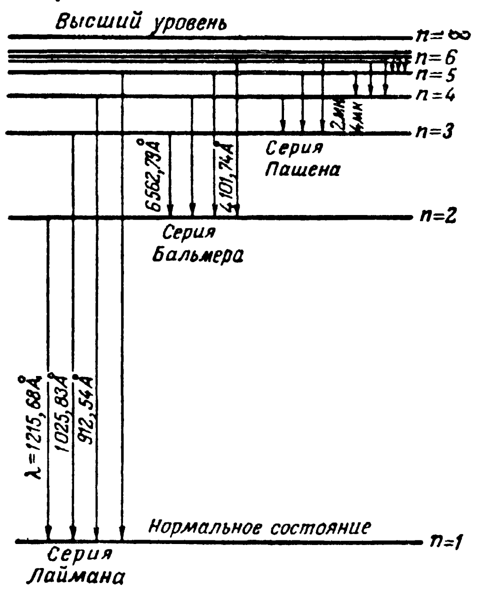


Рис 2. Схема возможных энергетических уровней атома водорода.

Картина возможных энергетических уровней веществ, если ее изобразить графически, чрезвычайно сложна Для иллюстрации рассмотрим простейший атом водорода, состоящий, как известно, из ядра и одного электрона Упрощенная схема возможных энергетических уровней атома водорода показана на рис. 2. Верхний (высший) уровень соответствует состоянию водорода, когда его электрон удален за пределы атома. Горизонтальная линия внизу графика характеризует атом, электрон которого находится на самой внутренней разрешенной орбите ($n=1$). Такое состояние атома называется нормальным или основным. Остальные горизонтальные линии характеризуют другие разрешенные орбиты, соответствующие возбужденным состояниям атома Направленные вниз стрелки указывают возможные процессы излучения энергии атомами водорода. Число n определяет энергию электрона и называется главным квантовым числом. Это число может принимать значения $n=1, 2, 3, \ldots$ Для каждого значения числа n существует n разрешенных орбит.

Возможны три вида взаимодействия квантовых систем с электромагнитным полем. С двумя из них мы уже познакомились: это — поглощение внешнего электромагнитного поля определенной частоты, соответствующей разрешенным энергетическим уровням системы, и излучение кванта энергии при наличии внешнего поля. Третий процесс — это так называемое спонтанное (самопроизвольное) излучение. Частица, находящаяся в возбужденном состоянии (на верхнем энергетическом уровне), совершая спонтанный переход на нижний уровень, также отдает избыточную энергию в виде кванта излучения соответствующей частоты Спонтанное излучение в квантовых приборах проявляется в виде шумов, оно является беспорядочным и поэтому широкополосным. Свечение нагретых тел, люминесценция и т. п. обусловливаются спонтанным излучением. Вероятность спонтанных переходов пропорциональна кубу частоты (f^3) и на радиочастотах очень мала В оптическом диапазоне спонтанное излучение проявляется сильнее и с ним приходится считаться.

Одновременное наличие трех процессов взаимодействия внешнего поля с квантовой системой — поглощения, излучения под действием поля и спонтанного излучения — поддерживает равновесное состояние системы. В условиях термодинамического равновесия среднее число частиц, находящихся в том или ином энергетическом состоянии, подчиняется закону Больцмана (рис 3). По этому закону отношение числа частиц на двух уровнях выражается формулой

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}},$$

где N_1 — число частиц, находящихся на уровне *1* и обладающих энергией E_1;

N_2 — число частиц с энергией E_2;

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град* — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура

Из рассмотрения закона Больцмана и иллюстрирующего этот закон рис. 3 видно, что при термодинамическом равновесии на более высоком энергетическом уровне всегда находится меньше частиц, чем на более низком. Каждому значению температуры соответствует определенное распределение частиц; с увеличением температуры число частиц на рассматриваемых уровнях выравнивается. При бесконечно высокой температуре, если бы ее можно было создать, достигается равенство количества частиц на всех уровнях.

Если квантовая система каким-либо образом выведена из состояния равновесия и воздействие на нее прекращено, то частицы начнут возвращаться в исходное состояние, система будет переходить в основное состояние. Запасенная системой энергия будет расходоваться на нагрев окружающей среды. Этот процесс называется релаксационным и протекает во времени по экспоненциальному закону [1]. Постоянная времени T_1 этого экспонен-

---

[1] Отметим, что таким же математическим выражением определяется и разряд конденсатора через сопротивление.

циального процесса называется временем релаксации. Последнее определяет скорость убывания избыточной внутренней энергии системы, запасенной от внешнего источника.

Весьма важным является установленное Эйнштейном равенство вероятностей переходов частиц под действием резонансного электромагнитного поля на верхний энергетический уровень (в возбужденное состояние) и с верхнего энергетического уровня на низший (в невозбужденное — основное состояние) Под вероятностью понимается относительное число переходов

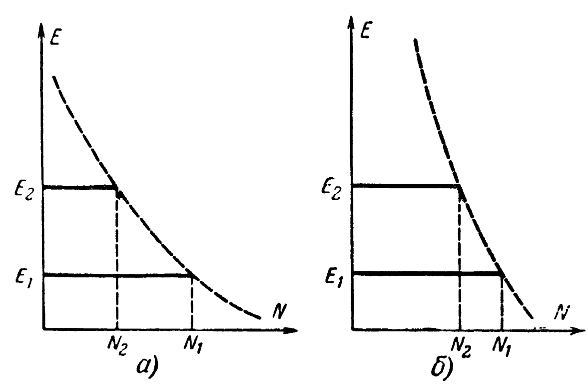


Рис. 3 Распределение частиц в квантовой системе. *а* — при абсолютной температуре $T=10°$ К; *б* — при абсолютной температуре $T=300°$ К.

частиц из одного состояния в другое в единицу времени. Так как в состоянии теплового равновесия в квантовой системе по закону Больцмана на нижнем энергетическом уровне находится больше частиц, чем на верхних уровнях, а вероятности переходов частиц с уровня на уровень в любом направлении равны, то число переходов с низшего уровня на высший будет больше, чем с высшего на низший Этим объясняется тот факт, что в обычных условиях вещества поглощают электромагнитную энергию. Поглощение электромагнитной энергии зависит от интенсивности внешнего поля, т. е. плотности энергии приходящего излучения

Увеличение интенсивности внешнего поля приводит к увеличению поглощения до тех пор, пока число частиц на обоих уровнях, между которыми происходит обмен энергией поля и вещества, не сравняется Такое состояние системы называется состоянием насыщения. В этом состоянии число поглощаемых квантов, т. е количество поглощаемой энергии, будет равно энергии, отводимой от системы релаксационными процессами.

2. УСИЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Рассмотрев процессы взаимодействия электромагнитного поля с квантовыми системами, мы узнали, что обмен энергией между веществом и внешним полем происходит отдельными

порциями — квантами. Поглощение кванта энергии веществом вызывает переход частицы квантовой системы на верхний энергетический уровень Частица возбуждается, а энергия внешнего электромагнитного поля уменьшается на величину поглощенного кванта. Таким образом частица приобретает избыточную энергию за счет внешнего поля; она как бы запасает энергию этого поля. Возбужденная частица затем под воздействием внешнего электромагнитного поля соответствующей (собственной) частоты совершает переход на низший энергетический уровень Этот переход сопровождается излучением ею кванта энергии. Запасенная частицей энергия отдается внешнему полю, увеличивая его энергию

Падающая электромагнитная волна повышает вероятность перехода возбужденной частицы в состояние с меньшей энергией. Она как бы подталкивает частицу, побуждая ее излучить энергию Таким образом, внешнее электромагнитное поле стимулирует или индуцирует испускание кванта энергии возбужденной частицей Излучение электромагнитной энергии, возбужденной квантовой системой под действием внешнего поля, называется индуцированным излучением. Возбужденная частица под воздействием кванта падающего поля всегда излучает точно такой же квант (тождественный падающему кванту как по частоте, так и по фазе), т. е. индуцированное излучение является когерентным по отношению к внешнему полю. В том случае, когда квантовая система выведена из состояния термодинамического равновесия, т. е число частиц, находящихся в возбужденном состоянии, превышает их число в основном состоянии, процесс индуцированного излучения будет преобладать над резонансным поглощением. Энергия внешнего поля будет возрастать, т. е будет происходить усиление этого поля.

Итак, имея возбужденную квантовую систему с подходящими частотами переходов, можно получить усиление слабого электромагнитного сигнала, а при определенных условиях и генерацию электромагнитной волны. Нужно только найти удобные и экономичные способы возбуждения квантовой системы.

Состояние квантовой системы, имеющей избыток частиц, находящихся в верхнем энергетическом состоянии, по отношению к числу частиц в низших состояниях, или, как говорят, с инвертированной населенностью уровней, при рассмотрении принципов работы квантовых приборов принято характеризовать особым понятием — так называемой о т р и ц а т е л ь н о й т е м п е р а т у р о й. Для уяснения этого понятия рассмотрим формулу Больцмана, определяющую распределение частиц на двух уровнях квантовой системы при температуре T:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}.$$

Определяя из этого выражения температуру, получим:

$$T = \frac{E_2 - E_1}{k \ln \left(\frac{N_2}{N_1} \right)}.$$

При термодинамическом равновесии N_2 меньше N_1, логарифм отношения N_2/N_1 отрицателен и температура положительна В случае неравновесной системы с инвертированной населенностью уровней, когда N_2 больше N_1, температура окажется отрицательной.

Таким образом, степень возбуждения квантовой системы (ее неравновесность) характеризуется отрицательной температурой

Следует заметить, что понятие отрицательной температуры самостоятельного физического смысла не имеет. Это понятие применимо только к определенным двум энергетическим уровням Однако им широко пользуются при описании процессов в квантовых приборах.

Состояние системы с отрицательной температурой является неустойчивым Релаксационные процессы, спонтанное излучение, а также взаимодействие с внешним полем будут возвращать систему в невозбужденное состояние Для получения усиления необходимо, чтобы время пребывания системы в состоянии с отрицательной температурой было как можно более длительным, т е чтобы постоянная времени T_1 релаксационного процесса была по возможности большей. Получение состояния с отрицательной температурой в диапазоне СВЧ облегчается тем, что время жизни возбужденных частиц относительно большое. Так, например, в сантиметровом диапазоне оно равно 10^{-6} *сек*, тогда как в оптическом диапазоне оно составляет 10^{-8}—10^{-10} *сек.*

3. МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАНТОВЫХ СИСТЕМ

Чтобы получить усиление радиосигнала, нужно его пропустить через среду с отрицательной температурой. Как же получить состояние с отрицательной температурой? Что надо сделать, чтобы населенности верхних уровней энергии активной среды превышали населенности нижних уровней?

Было предложено несколько методов обогащения населенности верхних уровней энергии: адиабатическое быстрое прохождение, импульсная инверсия на 180°, внезапное обращение поля, использование оптического облучения, метод сортировки молекул, применение вспомогательного излучения в трехуровневой системе и др.

Широкое распространение и практическое использование получили последние три из названных методов. Другие методы возбуждения могут обеспечить только прерывистый режим работы усилителей и генераторов, имеют весьма низкий к. п. д., неудобны в эксплуатации. Практически они малопригодны, поэтому рассматривать их мы не будем.

Метод сортировки молекул заключается в разделении молекул, находящихся в различных энергетических состояниях, и удалении из молекулярного пучка невозбужденных молекул. С этим методом получения среды с отрицательной температурой мы познакомимся на примере молекулярного усилителя и генератора на аммиаке Нужно сказать, что такой метод может быть применен только к некоторым газам (например, аммиаку), синильной кислоте, формальдегиду и некоторым другим веществам.

Квантовый усилитель и генератор на аммиаке был первым работающим прибором, основанным на использовании индуцированного излучения. Как уже отмечалось, он был создан в 1954 г. одновременно и независимо в СССР и США. За рубежом (в США) его назвали «мазер» — по первым буквам английского названия этого прибора, которое в переводе означает—усилитель микроволн [1] посредством индуцированного излучения. В литературе термин «мазер» иногда применяется и к другим типам усилителей, в том числе и к квантовым парамагнитным усилителям.

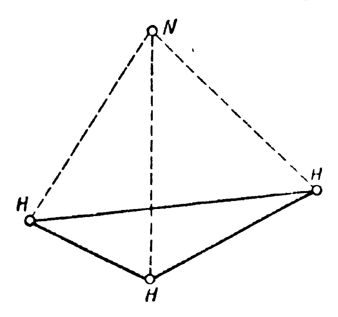


Рис. 4. Структура молекулы аммиака.

Как же работает квантовый усилитель и генератор на аммиаке, как он устроен?

Молекула аммиака NH_3 имеет вид правильной пирамиды (рис. 4), в вершинах основания которой расположены атомы водорода, а атом азота колеблется относительно плоскости, в которой расположены атомы водорода Колебания атомов азота происходят без затраты энергии и называются инверсией. Вследствие инверсии в молекуле аммиака некоторые из возможных уровней энергии раздваиваются, причем расстояния между образовавшимися уровнями соответствуют диапазону СВЧ. Таким образом, в обычном газообразном аммиаке часть молекул всегда находится в возбужденном состоянии. При этом одним из наиболее интенсивных переходов является переход, соответствующий длине волны 1,27 *см*.

Разделение молекул аммиака, находящихся в различных энергетических состояниях, удается сравнительно просто осуществлять благодаря тому, что возбужденные молекулы, помещенные в неоднородное электрическое поле, стремятся в сторону более слабого поля, и, наоборот, молекулы, находящиеся в нижнем энергетическом состоянии, устремляются в сторону сильного поля. Для создания полей нужной конфигурации используется особый квадрупольный конденсатор (рис. 5). Если через такой конденсатор пропустить пучок молекул аммиака, то вдоль оси конденсатора расположатся преимущественно возбужденные молекулы, а невозбужденные будут отклонены к краям конденсатора. Пучок молекул, вытекающих вблизи оси конденсатора, состоит, в основном из молекул с избыточной энергией, способных совершать индуцированные переходы, т. е. обладает отрицательной температурой. Если вдоль такого пучка пропустить слабую волну длиной 1,27 *см*, то произойдет ее усиление.

На практике для улучшения условий взаимодействия волны с пучком молекул применяется объемный резонатор, настроенный на частоту используемого перехода, в который направляются отсортированные молекулы и волна, подлежащая усилению. Поля,

---

[1] Микроволны по терминологии, принятой в США, соответствуют диапазону СВЧ.

возбуждаемые волной в резонаторе, в тысячи раз превосходят поля, образуемые волной в свободном пространстве, поэтому взаимодействие активных молекул с этой волной в резонаторе будет гораздо более сильным и эффект усиления возрастет.

Усиление и выходная мощность таких усилителей зависят от числа влетающих в резонатор возбужденных молекул. Это число увеличивается с ростом интенсивности пучка молекул, поступающих в резонатор. Получить молекулярный пучок большой

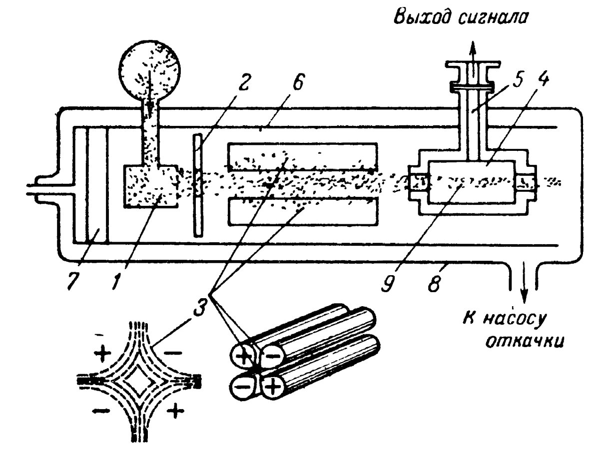


Рис. 5. Схема устройства квантового усилителя на пучке молекул аммиака.

1 — источник пучка; *2* — диафрагма; *3* — квадрупольный конденсатор и его поле; *4* — резонатор; *5* — волновод; *6* — охлаждаемый кожух; *7* — жидкий азот, *8* — корпус; *9* — молекулярный пучок.

плотности довольно трудно, и если даже такой пучок сформирован, то далеко не все молекулы, вышедшие из источника, попадут в сортирующую систему. Еще меньшая часть их попадает в резонатор и участвует в работе усилителя. Частота электромагнитных колебаний, которые можно усилить с помощью молекулярного пучка, определяется свойствами активного вещества и выбранными энергетическими переходами. Полоса пропускания такого усилителя определяется шириной спектральной линии активного вещества. Она также зависит от плотности молекулярного пучка и некоторых других факторов.

Устроен молекулярный усилитель на аммиаке следующим образом (рис. 5). Внутри сосуда, из которого выкачан воздух, помещены источник молекулярного пучка, сортирующая система и колебательный контур (резонатор). Источником пучка служит небольшая камера, закрытая решеткой или сеткой с отверстиями 0,5×0,5 *мм*. В этой камере поддерживается давление около 0,1 *мм рт. ст.* Такое небольшое давление в камере и решетка с большим числом маленьких отверстий нужны для того, чтобы молекулы, вылетая из камеры, не сталкивались между собой, так

как только в этом случае будет сформирован молекулярный пучок, а не обычная струя газа. Для большей направленности пучка после его источника ставится еще охлаждаемая жидким азотом диафрагма с круглым отверстием 5 *мм*. Сортирующей системой служит уже рассмотренный нами цилиндрический квадрупольный конденсатор, через который молекулярный пучок направляется в колебательный контур, представляющий собой объемный резонатор.

Для работы усилителя молекулы аммиака должны непрерывно выходить из источника пучка и поступать в резонатор. Следовательно, так же непрерывно нужно убирать из рабочего объема усилителя молекулы нижнего энергетического уровня, отсортированные квадрупольным конденсатором, а также молекулы, совершившие индуцированные переходы. Поток газа на выходе усилителя составляет миллиарды миллиардов молекул в секунду. Удалить такое количество молекул обычным способом, т. е. попросту откачать, очень сложно (потребуются очень большие насосы). Поэтому был применен более простой и эффективный способ удаления отработанных молекул, заключающийся в вымораживании ненужных молекул с помощью жидкого азота. Молекулы аммиака при этом примерзают к металлическому внутреннему корпусу (радиатору), охлаждаемому жидким азотом [1].

В связи с тем, что усилитель на пучке молекул аммиака имеет весьма узкую полосу пропускания (порядка 100 *кгц*), а перестройка его по частоте затруднена, области применения такого усилителя ограничены.

Если увеличить число возбужденных молекул, поступающих в резонатор, то при некотором количестве таких молекул произойдет компенсация потерь резонатора, усилитель самовозбудится и превратится в автогенератор.

Молекулярные генераторы являются самыми стабильными генераторами радиоволн. Если, например, колебания такого генератора использовать для стабилизации хода часов, то их ошибка не будет превышать 1 *сек* за 300 лет непрерывной работы.

Метод получения среды с отрицательной температурой путем сортировки частиц (молекул) в разных энергетических состояниях может быть применен также и к некоторым магнитным атомам, например серебру или рубидию. В этом случае, как и в квантовых приборах на аммиаке, используется источник пучка молекул (газовая печь). Сортировка молекул по состояниям производится с помощью специальной магнитной системы с неоднородным магнитным полем. Прошедший через неоднородное магнитное поле пучок направляется в резонатор, где при соблюдении соответствующих условий должно происходить индуцированное излучение.

Наиболее удачным методом возбуждения квантовых систем для получения среды с отрицательной температурой оказался метод использования вспомогательного излучения в трехуровневой системе. Ввиду важности этого метода для уяснения принципов действия квантовых парамагнитных усилителей и оптических квантовых генераторов мы рассмотрим его более подробно.

---

[1] Аммиак замерзает при температуре —78° C (температура жидкого азота — 197° C).

4. УСИЛЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Квантовые малошумящие усилители и генераторы радио и оптического диапазона волн строятся на основе использования индуцированного излучения в трехуровневой системе. Такой метод получения состояний с отрицательной температурой был предложен советскими учеными Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в 1955 г.

Существо этого метода состоит в использовании эффекта насыщения одного из переходов под дествием вспомогательного излучения в многоуровневой квантовой системе для получения отрицательной температуры между другой парой уровней этой системы. Пусть имеется квантовая система с тремя энергетическими уровнями $E_3>E_2>E_1$, как показано на рис. 6,*а*. В состоянии теплового равновесия количество частиц (молекул, ионов, атомов и др.) на каждом из этих уровней N_1, N_2 и N_3 определяется законом Больцмана, т. е. $N_1>N_2>N_3$, причем разность чисел частиц на двух различных уровнях увеличивается с уменьшением температуры среды.

Допустим, что все возможные энергетические переходы с 3-го уровня на 1-й, с 3-го на 2-й и с 2-го на 1-й разрешены. Если эту систему облучить полем от внешнего вспомогательного генератора с частотой $f_{1,3}=\frac{E_3-E_1}{h}$, соответствующей переходу между уровнями *1* и *3*, то часть частиц перейдет на уровень *3*.

Вспомогательное излучение обычно называют «подсветкой» или «н а к а ч к о й» («подкачкой»). При достаточной интенсивности вспомогательного поля накачки (достаточной мощности генератора), когда энергетические переходы частиц под действием этого поля преобладают над тепловыми релаксационными процессами, число частиц на верхнем (третьем) и нижнем (первом) уровнях окажется одинаковым ($N'_3\approx N'_1$), т. е. произойдет насыщение квантового перехода от E_3 к E_1.

Могут возникнуть следующие положения: число частиц на уровне *3* больше, чем на уровне *2*; число частиц на уровне *2* больше, чем на уровне *1*; число частиц на всех трех уровнях одинаково. Избыток числа частиц означает, что получена отрицательная температура в первом случае между уровнями *3* и *2* и во втором между уровнями *2* и *1* (рис. 6,*б*). Направим теперь в эту систему электромагнитную волну с частотой $f_{3,2}=\frac{E_3-E_2}{h}$, соответствующей переходу с третьего уровня на второй. В результате взаимодействия волны с системой частицы будут совершать индуцированные переходы с уровня *3* на уровень *2* с излучением квантов, тождественных этой волне, т. е. произойдет ее усиление. Усиление волны получается за счет высвобождения избыточной энергии, приобретенной системой (частицами) от генератора накачки (генератор накачки здесь является источником питания аналогично источнику постоянного напряжения в обычном ламповом усилителе). Точно так же можно получить усиление электро-

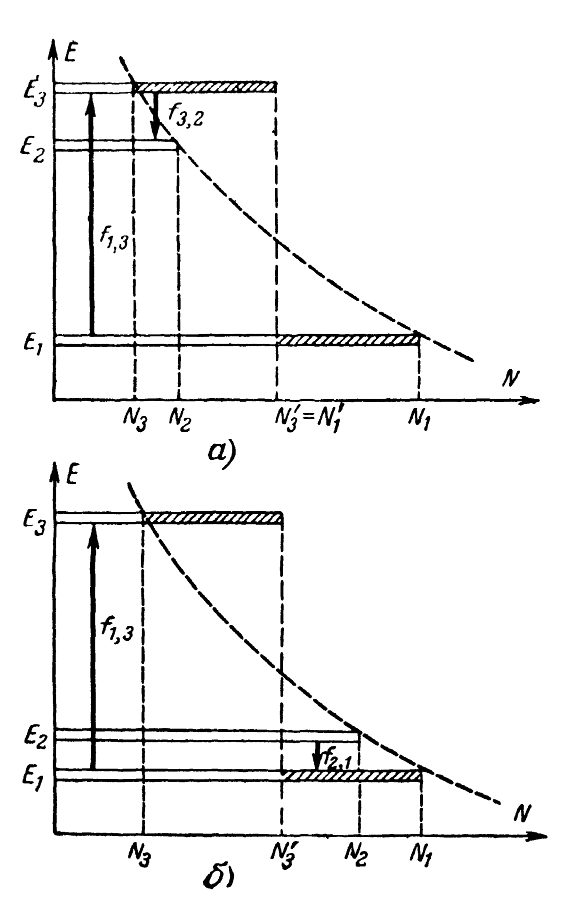
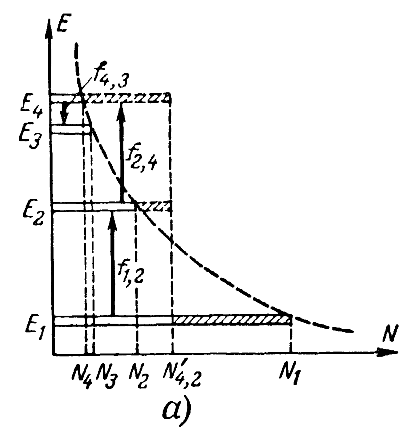


Рис 6 Схемы подведения накачки и сигнала в трехуровневой квантовой системе.

магнитной волны с частотой $f_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}$, соответствующей переходу между вторым и первым уровнями (рис. 6,*б*).

Для получения усиления на частоте перехода между уровнями *3* и *2* нужно, чтобы средний уровень был расположен выше середины интервала между нижним и верхним уровнями. Усиление же между уровнями *2* и *1* может быть получено, когда средний уровень расположен ниже середины интервала между нижним и верхним из трех уровней.



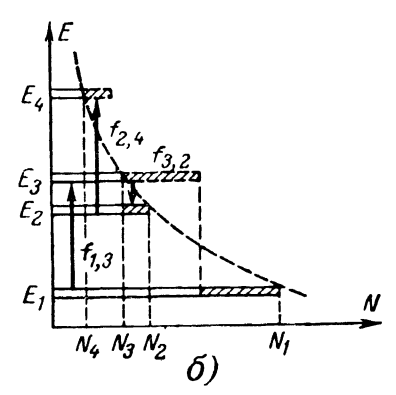


Рис. 7. Схемы подведения накачки и сигнала в четырехуровневой системе.

Возможны и другие варианты усиления с использованием метода вспомогательного излучения. В частности, можно использовать четыре энергетических уровня (рис 7,*а*). Накачка в этом случае подается на частотах $f_{1,2}$ и $f_{2,4}$, чем и достигается насыщение переходов от E_1 к E_2 и от E_2 к E_4 При этом возникнет избыток числа частиц на уровне *4* по отношению к уровню *3* и слабый сигнал на частоте $f_{4,3}$, направленный в систему, будет усилен. В некоторых веществах путем подбора уровней можно получить эффект насыщения одновременно обоих переходов при использовании одной, а не двух частот накачки. Можно также насыщать переходы между уровнями E_1—E_3 и E_2—E_4 (рис. 7,*б*). В этом случае рабочим будет переход между уровнями *3* и *2*. В пятиуровневой системе осуществим режим с частотой накачки ниже частоты сигнала.

Из рассмотрения различных вариантов подведения вспомогательного излучения к квантовой системе (рис. 6 и 7) видно, что частота генератора накачки, как правило, должна быть более чем в 2 раза выше частоты усиливаемого сигнала. Это обстоятельство вносит определенные затруднения при создании усилителей в коротковолновой части миллиметрового диапазона Выбор того или иного варианта подведения энергии накачки и использования ра-

бочего перехода зависит от характеристик квантовой системы, т. е. свойств активного вещества, от расстояний между уровнями энергии и главным образом от вероятностей переходов между энергетическими уровнями. Предложенный в СССР Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым метод получения состояний с отрицательными температурами с использованием вспомогательного излучения в трехуровневой системе оказался очень плодотворным. Квантовые усилители и генераторы, работающие на основе этого метода, находят все более широкое применение.

К настоящему времени известно несколько классов квантовых приборов, в основе работы которых лежит индуцированное излучение возбужденных квантовых систем. К ним относятся приборы для получения электромагнитных колебаний с чрезвычайно высокой стабильностью частоты (стандарты частоты), устройства, способные регистрировать предельно слабые электромагнитные колебания (квантовые усилители — мазеры), генераторы и усилители когерентных монохроматичных электромагнитных колебаний с высокой направленностью (квантовые генераторы и усилители светового и инфракрасного диапазонов — лазеры, иразеры) и радиоспектроскопы с чрезвычайно высокой разрешающей способностью. Эти наиболее разработанные квантовые приборы уже нашли практическое применение.

Кроме указанных, возможны и приборы другого назначения, например квантовые гироскопы, значительно превосходящие по точности сохранения направления движения современные механические гироскопы, квантовые магнитометры, обеспечивающие регистрацию очень малых изменений магнитного поля, и квантовые счетчики — преобразователи принимаемых инфракрасных квантов энергии в более высокочастотные кванты, для которых существуют хорошие приемники.

Среди перечисленных приборов большой практический интерес представляют квантовые парамагнитные усилители СВЧ, обладающие чрезвычайно малым уровнем собственных шумов.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО КВАНТОВЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ СВЧ

5. ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС

При создании квантовых генераторов СВЧ, используемых в качестве стандартов частоты, стремятся получить возможно более стабильную частоту колебаний, для чего подбираются активные вещества с узкими спектральными линиями. Наиболее узкие спектральные линии наблюдаются у газов, когда их молекулы между собой не взаимодействуют, т. е. при наличии молекулярного пучка. Получить в усилительных приборах с молекулярным пучком приемлемые для практики полосу пропускания и усиление затруднительно. Между тем для многих применений нужны

усилители, обладающие возможно более широкой полосой пропускания, допускающие перестройку по частоте и имеющие большой коэффициент усиления. Поэтому в квантовых усилителях в качестве рабочего тела применяются твердые вещества, у которых частицы сильно взаимодействуют между собой.

В современных квантовых усилителях СВЧ активными веществами служат парамагнитные кристаллы, а сам эффект усиления радиосигнала в квантовом усилителе на твердом теле основан на использовании электронного парамагнитного резонанса, открытого, как уже упоминалось, в 1944 г. советским ученым Е. К. Завойским. Такие усилители называются квантовыми парамагнитными усилителями (КПУ).

Прежде чем приступить к ознакомлению с явлением парамагнитного резонанса, вспомним кратко различные виды магнетизма.

Все вещества, окружающие нас, в зависимости от поведения их в магнитном поле разделяются на парамагнитные и диамагнитные. При помещении диамагнитного вещества (диамагнетика) в магнитном поле, в нем возникает собственное магнитное поле, ослабляющее внешнее намагничивающее поле. Такие вещества выталкиваются из неоднородного магнитного поля. Как говорят, диамагнитные вещества имеют отрицательную магнитную восприимчивость. Величина этой восприимчивости очень мала и почти не зависит от температуры. Большинство простых веществ — диамагнетики; к ним относятся, например, углерод, кадмий, медь, серебро и др.

В парамагнитных веществах (парамагнетиках), помещенных в магнитное поле, возникающее внутреннее магнитное поле совпадает с внешним и усиливает его. Стержень из парамагнитного вещества располагается вдоль силовых линий внешнего поля; эти вещества втягиваются в неоднородное магнитное поле Магнитная восприимчивость парамагнетиков положительна. Величина восприимчивости у них больше, чем у диамагнитных веществ, и обычно увеличивается с понижением температуры. Парамагнитными веществами являются, например, элементы группы железа (хром, никель, железо, кобальт, марганец), редкоземельные элементы (гадолиний, самарий, эрбий и др.), все кристаллы, содержащие элементы указанных групп совместно с неметаллическими атомами, некоторые примесные полупроводники и свободные радикалы, ферромагнитные материалы, некоторые газы (водород, кислород), жидкости и др.

Вещества, обладающие сильными, ярко выраженными магнитными свойствами, выделены в особую группу и получили название ферромагнетиков или ферромагнитных веществ. К ним относятся железо, никель, кобальт, гадолиний Ферромагнитными свойствами обладают также сплавы этих элементов, соединения окислов железа с окислами других металлов и соли железистой кислоты — широко применяемые в радиотехнике ферриты. Ферромагнитные и антиферромагнитные вещества имеют упорядоченную магнитную структуру, т. е. они обладают постоянным магнетизмом отдельных участков. Ферромагнетизм — это свойство не отдельного атома, а свойство кристалла. Для таких веществ характерно отклонение от пропорциональности между внешним полем и образующейся под его влиянием намагниченностью; при их

перемагничивании сохраняется остаточная намагниченность. При высоких температурах ферромагнитные свойства материала нарушаются и он превращается в парамагнетик. Температура, при которой исчезает ферромагнетизм, называется точкой Кюри.

Элементарные частицы, в частности электрон, кроме электрического заряда, обладает собственным механическим моментом количества движения, который называется спином электрона S. Грубо говоря, электрон можно уподобить волчку. Спин электрона в единицах $\hbar/2\pi$ равен $^1/_2$. Благодаря спину электрон имеет собственный магнитный момент, т. е. действует как маленький постоянный магнит. Величина магнитного момента пропорциональна средней скорости движения электрона и радиусу его орбиты. Магнитный момент электрона часто называют спиновым моментом или просто спином.

Известно, что атомы состоят из ядер, окруженных электронным облаком. Можно считать электроны вращающимися вокруг атомного ядра по определенным орбитам, что соответствует круговым электронным токам вокруг ядра. Кольцевой электронный ток также создает магнитное поле, которому соответствует определенный магнитный момент; этот момент называется орбитальным.

Магнитный момент свободного атома обусловливается магнитными моментами отдельных электронов и орбитальными магнитными моментами. Магнитный момент есть не только у электронов, но и у ядер атомов, однако ядерные магнитные моменты в тысячи раз (примерно в 2 000 раз) меньше магнитных моментов электронов. Тем не менее магнитный момент ядра вносит вклад в суммарный момент атома.

У атомов большинства элементов электроны входят в состав заполненных электронных оболочек. При этом суммарные спиновый и орбитальный моменты равны нулю. Атомы и ионы некоторых элементов имеют одну или две незаполненные оболочки и обладают некоторым результирующим магнитным моментом, который может взаимодействовать с внешним магнитным полем. Эффектом взаимодействия внешнего магнитного поля, приложенного к веществу, и атомарного магнитного момента и объясняется парамагнетизм. Если в результате взаимного влияния атомарных магнитных моментов в веществе происходит их самопроизвольная параллельная ориентация и образуются области с макроскопическим магнетизмом, то вещество является ферромагнитным.

Помещенная в магнитное поле парамагнитная частица (электрон, атом, ион) будет обладать энергией ориентации, зависящей от угла между ее магнитным моментом и приложенным полем H. Подобным образом изменяется энергия ориентации стрелки компаса в магнитном поле. Когда стрелка ориентирована по направлению поля, энергия ее взаимодействия с полем самая низкая (и равна нулю); при ориентации стрелки против поля эта энергия самая высокая.

Магнитный момент парамагнитной частицы, как оказывается, не может принимать любые значения как по величине, так и по ориентации во внешнем поле, иначе говоря, он является квантовой величиной. Энергия ориентации магнитных моментов во внешнем поле также может иметь только дискретные, квантовые

значения, кратные некоторой элементарной величине, — магнетону Бора:

$$\beta_м = \frac{eh}{2mc},$$

где h — постоянная Планка;
e — заряд электрона;
m — масса электрона;
c — скорость света.

В общем случае число возможных ориентаций магнитного момента парамагнитной частицы относительно направления магнитного поля и, следовательно, число возможных энергетических состояний равно $2S+1$. Для свободного электрона, спин которого $S=\frac{1}{2}$, число возможных значений проекции магнитного момента на направление приложенного поля будет $2S+1=2$, т. е. магнитный момент электрона во внешнем магнитном поле может иметь одно из двух значений $+\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ или $-\frac{1}{2}\frac{h}{2\pi}$ и может быть направлен либо вдоль, либо против внешнего поля. Уровни энергии такой частицы изображены на рис. 8,*а*. Разность энергии между этими двумя возможными энергетическими уровнями

$$\Delta E=2\beta_м H.$$

Чаще всего используются вещества (частицы), у которых спин S и результирующий магнитный момент больше $^1/_2$. В этом случае получается большее число возможных энергетических уровней. На рис. 8,*б* изображены уровни энергии парамагнитной частицы со спином $S=\frac{3}{2}$.

Таким образом, при приложении магнитного поля к парамагнитной частице вследствие наличия у нее магнитного момента уровень энергии этой частицы расщепляется на несколько подуровней. Интервалы между подуровнями зависят от величины внешнего постоянного магнитного поля и при полях в десятки и сотни тысяч ампер на метр соответствуют диапазону СВЧ.

Расщепление энергетических уровней (расщепление спектральных линий) в магнитном поле получило название эффекта Зеемана по имени голландского физика, обнаружившего этот эффект в 1896 г. Эффект Зеемана был обнаружен в оптическом диапазоне волн, чем и объясняется его открытие намного раньше парамагнитного резонанса, о котором речь пойдет ниже, так как уже тогда имелись приборы для регистрации расщепления спектральных линий в оптическом диапазоне волн.

Прежде чем перейти к рассмотрению энергетических уровней парамагнитных кристаллов и квантово-механического описания электронного парамагнитного резонанса, познакомимся с классическим описанием такого резонанса. Это описание весьма приближенно, однако оно понятно и наглядно.

Если парамагнитная частица с магнитным моментом M помещена в постоянное магнитное поле (рис. 9), то на нее начинает

воздействовать вращающий момент, стремящийся повернуть вектор M по направлению поля H. Вследствие этого конец вектора магнитного момента частицы будет описывать окружность вокруг вектора H, т. е совершать так называемое прецессионное движение. Частота прецессии $f_п$ пропорциональна величине поля H. При наложении на такую систему переменного поля $H_с$ с круговой

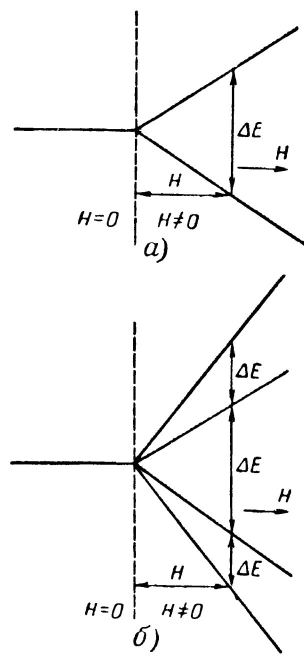


Рис 8 Уровни энергии парамагнитной частицы во внешнем постоянном магнитном поле.

а — спин равен $^1/_2$; *б* — спин равен $^3/_2$.

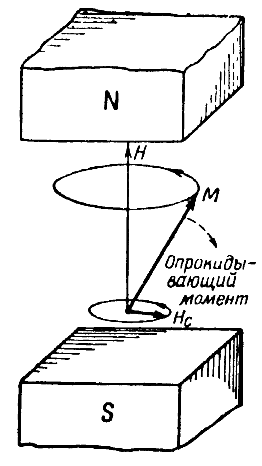


Рис. 9. Классическая модель условий парамагнитного резонанса.

поляризацией в плоскости, перпендикулярной вектору H, и частотой $f_с$ оно будет вызывать появление вращающего опрокидывающего момента. В том случае, когда частота $f_с$ отлична от частоты прецессии $f_п$, опрокидывающий момент в среднем равен нулю и поле $H_с$ не оказывает воздействия на магнитный момент частицы. При резонансе, когда частота переменного поля $f_с$ равна частоте прецессии $f_п$, на момент M будет воздействовать постоянный опрокидывающий момент, который будет отклонять момент M, стремясь увеличить угол прецессии. Результирующее движение вектора M будет происходить по спирали; при этом энергия будет передаваться от переменного поля $H_с$ веществу.

В случае переменного поля с линейной поляризацией его можно рассматривать как два поля круговой поляризации противоположных направлений. Из этих двух полей воздействие только одного, направление вращения которого совпадает с направлением прецессии вектора M, может привести к парамагнитному резонансному поглощению.

В парамагнитных усилителях применяются не изолированные парамагнитные частицы, а парамагнитные кристаллы. Вообще, в качестве рабочего вещества в таких усилителях могут быть использованы также парамагнитные жидкости и газы, но твердые тела по целому ряду свойств оказываются более удобными для применения их в радиотехнических устройствах. Наиболее существенной является возможность значительного ослабления взаимодействия магнитных моментов парамагнитных ионов путем разделения (разведения) их диамагнитными атомами в кристаллической решетке. Однако полностью исключить взаимное влияние магнитных полей отдельных ионов и взаимодействие спиновых магнитных моментов не удается Поэтому всегда имеет место передача энергии от возбужденных спинов другим спинам, находящимся на более низких энергетических уровнях; это так называемая спин-спиновая релаксация. Постоянная времени T_2 этого процесса называется временем спин-спиновой релаксации.

В различных точках кристалла, помещенного в магнитное поле, результирующее поле будет несколько отличаться от приложенного, в связи с чем энергетические уровни отдельных групп ионов будут также несколько различаться, а это приводит к возникновению полосы энергетических уровней с некоторой конечной шириной.

Помещенные в кристаллическую решетку диамагнитного вещества парамагнитные ионы подвергаются влиянию электрического поля решетки, что приводит к существенному изменению картины возможных энергетических уровней, изображенных на рис. 8. Прежде всего внутрикристаллическим полем резко ослабляется орбитальный магнитный момент, поэтому магнитный момент иона обусловлен в основном спиновым магнетизмом. Это объясняется тем, что в кристаллической решетке электроны в атомах движутся по своим орбитам в различных направлениях и величина результирующего орбитального тока очень мала. Вследствие связи остаточного орбитального момента с внутрикристаллическим полем решетки расположение возможных энергетических уровней будет зависеть не только от напряженности и постоянного внешнего магнитного поля, но и от угла θ между направлением этого поля и оптической осью симметрии кристалла. Кроме того, возникает начальное расщепление энергетических уровней при отсутствии внешнего магнитного поля, обусловленное внутренним электрическим полем кристалла, получившее название эффекта Штарка. Диаграмма уровней энергии парамагнитного кристалла в функции магнитного поля при различных ориентациях поля относительно оптической оси кристалла приведена на рис. 10.

Рассмотрим поведение парамагнитных частиц при воздействии на такую систему переменного электромагнитного поля, а точнее поведение спиновых магнитных моментов, так как именно спиновый магнетизм играет основную роль в магнитных свойствах кристалла.

В постоянном магнитном поле энергетические уровни кристалла, так же как и у изолированной парамагнитной частицы, расщепляются на несколько подуровней. В условиях теплового равновесия (с кристаллической решеткой) при некоторой абсолютной температуре T среднее число парамагнитных ионов (спи-

нов), находящихся на том или ином энергетическом уровне, определяется законом Больцмана.

$$\frac{n_i}{n_j} = e^{-\frac{E_i - E_j}{kT}},$$

где k — постоянная Больцмана;

n_i и n_j — число спинов на уровнях;

E_i и E_j — энергии состояний.

Как уже говорилось, каждому значению температуры соответствует определенное распределение спинов по уровням и чем ниже температура, тем сильнее разность населенностей уровней

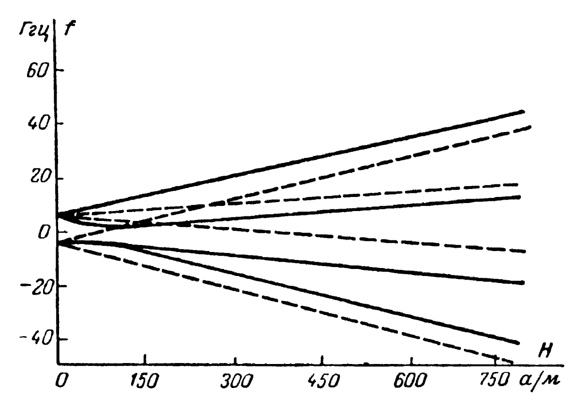


Рис. 10. Уровни энергии парамагнитного кристалла (рубина) при различных ориентациях магнитного поля относительно оптической оси кристалла

Сплошные линии — для $\theta = 90°$, а штриховые — для $\theta = 0°$

(рис. 3). Тепловое равновесие между парамагнитными ионами (спинами) и решеткой осуществляется благодаря релаксационным процессам, состоящим в переходах спинов с одного энергетического уровня на другой с передачей энергии решеткой спину или наоборот. При этих процессах происходит модуляция тепловыми колебаниями решетки электрического поля кристалла, вследствие чего изменяется орбитальное движение электрона, следовательно, меняется орбитальный магнитный момент, который, взаимодействуя со спиновым моментом, влияет на последний.

Установление больцмановского распределения частиц в системе (теплового равновесия) происходит по экспоненциальному закону, постоянная времени которого T_1 называется временем спин-решеточной релаксации. Это время характеризует скорость установления намагниченности парамагнитного кристалла при помещении его в магнитное поле, т. е. время, необходимое для ориентировки спинов либо по полю (большей их части), либо против поля (меньшей их части). Время спин-решеточной релаксации, как следует из приведенной трактовки ре-

лаксационного процесса, зависит от абсолютной температуры кристалла и от его структуры (спин-орбитальных связей и т. п). Установлено, что при низких температурах время спин-решеточной релаксации T_1 обратно пропорционально температуре и сокращается с повышением содержания (концентрации) парамагнитных ионов в решетке кристалла Заметим, что время релаксации для ионов (спинов), находящихся на более высоких уровнях, меньше времени релаксации для ионов, находящихся на низших энергетических уровнях

Если на парамагнитный кристалл с больцмановским распределением спинов воздействовать переменным электромагнитным полем с частотой $f_р$, соответствующей разности $\Delta E = hf_р$ каких-либо двух энергетических подуровней, то будут происходить переходы спинов с одного из этих подуровней на другой При переходах изменяются ориентации спиновых магнитных моментов (спинов). Так же как и в общем случае для квантовых систем, вероятность таких переходов одинакова (независимо от того, происходит ли переход с нижнего на верхний или с верхнего на нижний энергетический уровень) и пропорциональна интенсивности переменного магнитного поля Вспомним, что на нижних уровнях спинов больше, чем на верхних, следовательно, и число переходов с нижних на высшие уровни будет больше; поэтому в обычных условиях будет происходить поглощение энергии от переменного поля. Это поглощение электромагнитной энергии вследствие взаимного влияния спинов, помещенных в решетке кристалла, происходит в полосе частот от десятков до сотен мегагерц.

Собственно, явление поглощения парамагнитными ионами в кристалле, находящемся в постоянном магнитном поле, энергии высокочастотного электромагнитного поля и есть электронный парамагнитный резонанс, а приведенное выше объяснение является его квантово-механическим описанием.

По мере увеличения интенсивности высокочастотного поля, соответствующего по частоте переходу между двумя уровнями энергии парамагнетика, вероятность спиновых переходов возрастает и может превзойти вероятность релаксационных переходов. В этом случае населенности этих двух уровней уравняются — произойдет «насыщение уровней». Противодействуют насыщению релаксационные процессы, стремящиеся привести систему в тепловое равновесие Понятно, что чем сильнее релаксационные процессы, т. е чем меньше время релаксации T_1, тем большая мощность требуется от источника высокочастотного поля для насыщения уровней.

6. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХУРОВНЕВЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Современные квантовые парамагнитные усилители построены по идее советских ученых Н. Г. Басова и А. М. Прохорова.

Для усиления слабой электромагнитной волны в квантовой трехуровневой системе необходимо получить избыток населенности верхнего уровня энергии E_3, отстоящего от нижерасположенного уровня E_2 на энергетическом интервале $\Delta E_{3,2} = hf_c$, где f_c —

частота сигнала, подлежащего усилению (рис 11) Избыток населенности верхнего уровня достигается путем возбуждения системы от вспомогательного высокочастотного источника — источника накачки частотой $f_н = \frac{\Delta E_{3,1}}{h}$.

В результате взаимодействия волны с частотой $f_н$ со спиновыми магнитными моментами парамагнитных ионов (спинами) последние совершают переходы с уровня E_1 на уровень E_3, и при достаточной мощности источника накачки достигается насыщение этих уровней При этом уровень *3* становится более населенным,

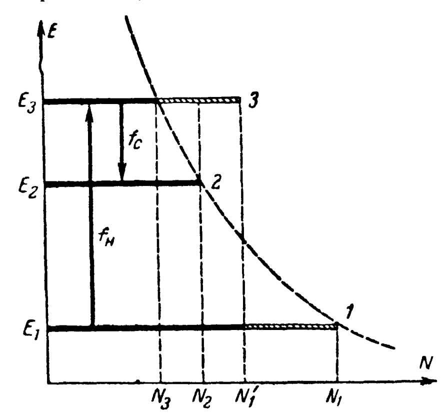


Рис 11. Схема подведения накачки и сигнала в квантовом трехуровневом парамагнитном усилителе.

чем уровень *2*. Таким образом создается система с отрицательной температурой (применительно к парамагнитным усилителям ее иногда называют спиновой отрицательной температурой) Направленный в такую систему слабый сигнал частотой $f_с = \frac{\Delta E_{3,2}}{h}$ вызовет индуцированные спиновые переходы с уровня *3* на уровень *2*. Произойдет усиление этого сигнала за счет когерентного индуцированного излучения.

Мощность, отдаваемая парамагнитным веществом полю высокочастотного слабого сигнала в трехуровневом усилителе, тем больше, чем ниже температура активного вещества. Приемлемые параметры усилителей пока удается получать только при охлаждении парамагнитного кристалла до температур, близких к абсолютному нулю. Дело в том, что при обычных температурах разности спиновых населенностей уровней очень малы, на самом нижнем уровне находится мало спинов (так как они распределены почти равномерно по всем уровням), немного их перейдет и на самый верхний уровень при насыщении данного перехода и, следовательно, мало спинов будет участвовать в индуцированном излучении. Кроме того, при высокой температуре тепловые

процессы (релаксационные), возвращающие систему в равновесное состояние, более интенсивны, время спин-решеточной релаксации T_1 мало и для противодействия релаксационным процессам нужна очень большая мощность накачки.

Эффективность усилителя тем выше, чем выше частоты сигнала и накачки. Полезно отметить перспективность использования в квантовом усилителе в качестве накачки источников света Такой усилитель применим для работы в самом коротковолновом радиодиапазоне, вплоть до инфракрасных лучей, так как с ростом частоты сигнала растет мощность, отдаваемая кристаллом.

Главные и основные возможности увеличения эффективности усилителей состоят в выборе активных материалов с большими спиновыми населенностями (с большими N) и с большими вероятностями индуцированных переходов.

7. ВЫБОР ПАРАМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ КВАНТОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

От того, насколько удачно выбрано активное вещество — парамагнитный кристалл, зависят основные характеристики квантового усилителя (коэффициент усиления, полоса пропускания и др) или, иначе говоря, качество усилителя.

Для работы в трехуровневом квантовом усилителе необходим кристалл, имеющий во внешнем магнитном поле приемлемой величины не менее трех уровней с разрешенными переходами на частоте сигнала, который мы хотим усилить, и на частоте накачки. Учитывая, что частота накачки, как правило, выше (не менее чем в 2 раза) частоты сигнала, весьма важным обстоятельством является возможность создания генераторов накачки достаточной мощности. Выбранные рабочие уровни должны иметь достаточную спиновую населенность, для того чтобы большее число спинов участвовало в переходах, так как чем больше будет переходов под воздействием слабого сигнала, тем больше его усиление.

Время спин-решеточной релаксации T_1 кристалла должно быть большим. Чем больше это время, тем меньшая мощность требуется от генератора накачки для насыщения уровней Поэтому стремятся подобрать парамагнитные кристаллы с такой решеткой, чтобы время T_1 было как можно больше Кроме того, для увеличения времени T_1, как уже говорилось, приходится охлаждать кристаллы до сверхнизкой температуры. Приемлемой величиной T_1 можно считать время 0,1 *сек*.

Концентрация парамагнитных ионов (спинов) в решетке кристалла и, следовательно, плотность спинов должны быть возможно большими. Однако не должно быть слишком сильного взаимодействия между соседними спинами, так как иначе время спин-спиновой релаксации T_2 будет недопустимо малым (обычно время T_2 должно быть 10^{-8}—10^{-9} *сек*). Чем больше спин-спиновое взаимодействие, тем большая требуется мощность накачки. Существует оптимальное значение концентрации парамагнитных ионов для различных кристаллов в зависимости от требований, предъявляемых к характеристикам усилителя. Требуемые кон-

центрации парамагнитных ионов в кристаллах достигаются путем разбавления их диамагнитными атомами в процессе выращивания кристаллов В кристаллах, используемых в КПУ, концентрация парамагнитных ионов обычно колеблется от сотых (и даже тысячных) долей процента до единиц процентов.

Кроме того, желательно, чтобы кристалл имел возможно меньшие диэлектрические потери, хорошую теплопроводность, был химически стабилен, допускал механическую обработку и т. п. Имеют большое значение также простая технология получения кристалла и его стоимость.

Кристаллы для квантовых приборов получаются путем синтеза из необходимых компонент различными способами, например рубиновые кристаллы приготовляются путем безтигельной плавки в пламени (метод Вернейля) при температуре порядка 2 050° С или методом выращивания из растворов в специальных автоклавах под давлением порядка 2 000 *ат* и температуре 500—600° С.

Следует отметить сильное влияние процесса получения кристаллов на их свойства. От этого процесса зависят, например, точность дозировки примесей, разброс концентрации парамагнитных ионов по объему, величина термических напряжений и т. п. Неоднородность распределения примесей в кристалле должна быть в пределах 5—10%, остаточные напряжения (после снятия напряжений, обычно путем отжига) не должны превышать 0,1—0,5 $кг/см^2$. Серьезные требования предъявляются и к точности обработки кристалла. Пластина, вырезанная из монокристалла, должна иметь ориентацию относительно главной оптической оси кристалла с точностью от единиц градусов до нескольких десятков минут. Наружная обработка поверхностей пластины производится с точностью 0,01—0,001 *мм*.

Первый трехуровневый КПУ был построен на кристалле этилсульфата гадолиния с 5%-ным содержанием парамагнитных ионов гадолиния. Построены также усилители на кристалле хромоцианида калия с концентрацией парамагнитных ионов хрома примерно 1%, на хромовом и железном корундах с различными концентрациями ионов хрома и железа. С успехом применяются кристаллы двуокиси титана с хромом и железом (рутил), и берилла с примесью хрома (изумруд).

Для улучшения свойств кристаллов могут применяться многокомпонентные активные примеси. Так, для увеличения времени спин-решеточной релаксации в кристалл этилсульфата гадолиния добавлялся церий. Хорошие характеристики имеют кристаллы корунда с хромом и железом одновременно. Возможно использование и большого числа других кристаллов, таких как вольфроматы цинка, железа с примесью ионов хрома, никеля, различных редких земель (например, самария) и др.

Наиболее широкое применение в квантовых приборах на твердом теле у нас и за рубежом, и в частности в квантовых усилителях СВЧ, получили кристаллы хромового корунда ($Al_2O_3Cr_2O_3$ — ярко-розового рубина), а также кристаллы двуокиси титана (TiO_2 — рутила) с примесями хрома и железа. Рубин наиболее удовлетворяет требованиям, предъявляемым техникой квантовых усилителей к активному веществу. Используя его, можно перекрыть весь диапазон сантиметровых волн. Осо-

бенно ценными являются физические свойства рубина — большая стойкость, твердость, высокая теплопроводность при низких температурах, способность выдерживать резкие многократно повторяющиеся изменения температуры, свариваемость с металлами и др. Важно также, что освоено промышленное производство рубина, позволяющее получать монокристаллы больших размеров (длиной до 100—200 *мм* и более). Как известно, искусственные рубины давно широко применяются в часовой промышленности. Однако процесс изготовления монокристаллов рубина для КПУ гораздо сложнее, чем изготовление «промышленных» камней.

Рубин и железный корунд для применения в трехуровневых КПУ были впервые предложены и использованы в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР А. М. Прохоровым с сотрудниками. Там же А. М. Прохоровым, А. А. Маненковым и Л. С. Корниенко были детально изучены свойства этих кристаллов.

В заключение скажем, что уже изучена возможность применения в квантовых усилителях целого ряда кристаллов. Однако исследована еще очень небольшая часть веществ и парамагнитных кристаллов, которые могут оказаться пригодными для работы в усилителях СВЧ. Поиски новых активных веществ продолжаются.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ТРЕХУРОВНЕВЫЕ КВАНТОВЫЕ ПАРАМАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Для практического осуществления КПУ на основе изложенных принципов, парамагнитный кристалл нужно поместить в постоянное магнитное поле, охладить до температуры, близкой к абсолютному нулю, а затем подать на такой кристалл электромагнитные поля накачки и сигнала. Взаимодействие полей сигнала и накачки с парамагнитным кристаллом обеспечивается в объемном резонаторе или волноводе, в котором существуют поля на частотах сигнала и накачки.

В зависимости от того, какая структура используется для концентрации полей и осуществления их взаимодействия с рабочим веществом, различают усилители резонаторного и волноводного типов. Усилители волноводного типа чаще называют усилителями бегущей волны.

Резонатор или волновод с кристаллом для охлаждения до необходимой температуры опускают в охлаждающую ванну — криостат с жидким гелием, представляющий собой двойной сосуд Дюара. Постоянное магнитное поле создается с помощью электромагнита, постоянного магнита или магнитной системы со сверхпроводящими обмотками. Схема построения КПУ показана на рис. 12.

Отметим, что необходимость охлаждения кристаллов до сверхнизких температур и связанное с этим применение специальных систем охлаждения является специфической особенностью КПУ, существенно усложняющей их эксплуатацию. До недавнего

времени серьезной помехой использования квантовых усилителей были также большой вес и габариты магнитной системы, создающей постоянное поле, необходимое для настройки усилителя на выбранные частоты сигнала и накачки. С разработкой постоян-

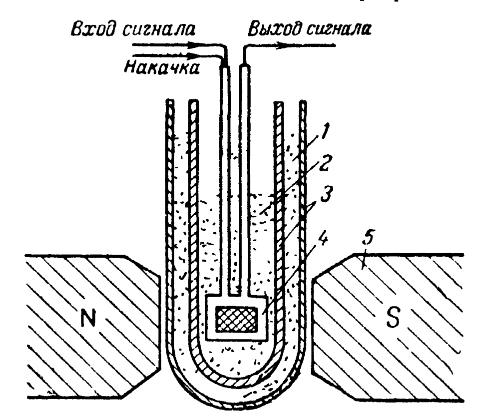


Рис. 12. Схема построения квантового парамагнитного усилителя.

1 — азот; *2* — гелий; *3* — сосуды Дюара; *4* — резонатор с кристаллом; *5* — магнитная система (с внешним постоянным магнитом).

ных магнитов и сверхпроводящих магнитов, погружаемых в сосуд Дюара, указанная трудность в значительной мере устранена.

8. РЕЗОНАТОРНЫЕ ПАРАМАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Резонаторные КПУ могут быть построены с резонатором отражающего типа и с проходным резонатором. Парамагнитный кристалл помещается в резонаторе. Мощность, излученная парамагнетиком, компенсирует собственные потери в резонаторе и поступает на выход усилителя. Заметим еще раз, что квантовый усилитель резонаторного типа является регенеративным усилителем.

Схемы усилителей с отражательным резонатором и с проходным резонатором изображены на рис. 13. В усилителе с проходным резонатором (рис. 13,*а*) сигнал, поступающий от антенны, подводится к резонатору с парамагнитным кристаллом по одной линии, а отводится по другой. Для обеспечения однонаправленного распространения сигнала (в направлении от антенны к приемнику) в линию включаются вентили[1].

[1] Вентили являются устройствами, пропускающими электромагнитную волну только в одном и поглощающими ее в обратном направлении. В КПУ проходного типа вентили препятствуют распространению отраженных волн и предотвращают попадание шумов приемника в КПУ.

Усилитель с проходным резонатором по сравнению с усилителем с отражательным резонатором (рис. 13,*б*) при том же усилении имеет полосу пропускания в 2 раза меньшую Объясняется это тем, что половина энергии, излученной кристаллом, уходит во входную линию и теряется в выходном сопротивлении источника сигнала. Поэтому, как правило, резонаторные КПУ строятся с отражательным резонатором. В усилителе по этой схеме

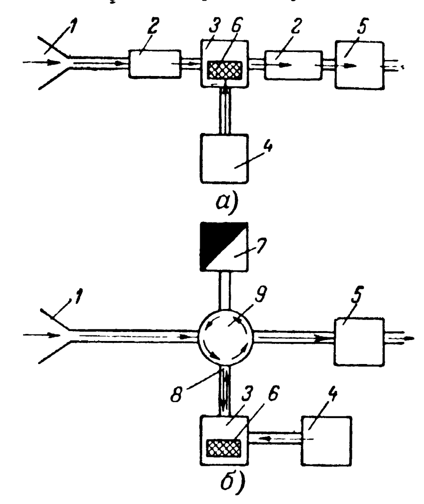


Рис 13. Схемы резонаторных квантовых усилителей

а — с проходным резонатором; *б* — с отражательным резонатором; *1* — антенна, *2* — вентили; *3* — резонатор; *4* — генератор накачки; *5* — приемник, *6* — парамагнитный кристалл; *7* — согласованная нагрузка; *8* — входная (и выходная) линия резонатора; *9* — циркулятор.

одна и та же линия используется для подачи в резонатор с кристаллом поступающего от антенны слабого сигнала, подлежащего усилению, и отведения усиленного сигнала. Разделение слабого входного и усиленного сигналов производится специальным ферритовым невзаимным устройством — циркулятором. Работа последнего основана на свойстве феррита при соответствующем намагничивании вращать плоскость поляризации электромагнитной волны в одном направлении независимо от направления движения волны через феррит. Конструктивно он имеет четыре эквивалентных плеча. В схеме квантового усилителя (рис. 13,*б*) циркулятор одним плечом подключен к антенне, вторым к резонатору, третьим к приемнику (вернее, к последующим каскадам приемника) и четвертым к согласованной нагрузке — поглотителю. Сигнал от антенны через ферритовый циркулятор попадает по линии в резонатор усилителя, куда поступает также энергия от генератора накачки. Из резонатора усиленный сигнал по той же ли-

нии поступает в приемник Шумы, излученные входом приемника, а также отраженная от его входа мощность (при плохом согласовании антенны и приемника) могут попасть только в поглотитель. Применение циркулятора исключает попадание и усиление шумов приемника в КПУ.

Резонатор КПУ должен резонировать на две частоты: частоту сигнала и частоту накачки Создание такого двухчастотного резонатора с высокой добротностью одновременно на двух частотах и с независимой настройкой на эти частоты является трудной задачей.

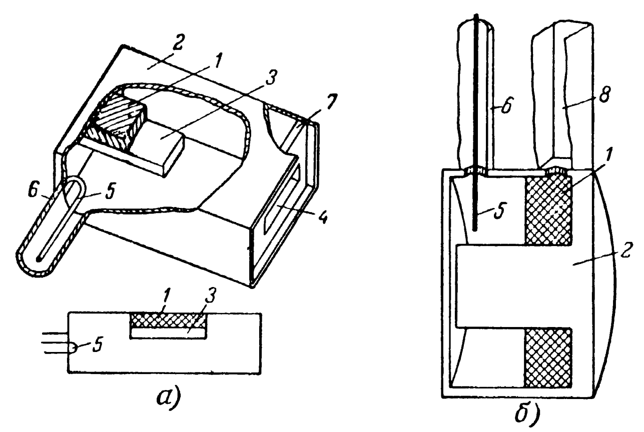


Рис 14 Схемы устройства резонаторов квантовых парамагнитных усилителей.

1 — парамагнитный кристалл, *2* — стенка волновода (резонатора); *3* — полосковая линия, *4* — щель; *5* — петля (штырь), *6* — коаксиальная линия, *7* — поршень, *8* — волновод накачки.

В настоящее время разработано много различных конструкций двухчастотных резонаторов для КПУ. Резонатор усилителя может сообщаться с жидким гелием или быть герметичным. Предпочтительнее последнее, так как в резонаторе, заполненном жидким гелием, вследствие выделения тепла монокристаллом образуются пузырьки газа (гелий кипит), что заметно влияет на стабильность усиления. Выбор того или иного типа резонатора производится в зависимости от рабочей частоты, которая обычно определяется назначением усилителя, а также частоты накачки; последняя выбирается, исходя из имеющихся генераторов необходимой мощности и свойств кристалла Парамагнитный кристалл в резонаторе перемещается в районе пучности магнитных полей сигнала и накачки с учетом ориентации оптической оси кристалла и постоянного магнитного поля. Размеры образца парамагнитного вещества должны обеспечивать приемлемые параметры усилителя и зависят от частоты сигнала, конструкции резонатора, мощности генератора накачки (образец должен хорошо просвечиваться, насыщатся полем накачки) и характеристик самого активного вещества.

Например, в США были построены усилители десятисантиметрового диапазона на рубине с прямоугольными пластинками размерами 10×4,5×3 *мм*. В трехсантиметровом диапазоне применялись рубиновые кристаллы размерами 10×7×0,8 *мм*. Могут быть построены резонаторы с различным заполнением активным веществом; например, посеребрив грани парамагнитной пластины, получают резонатор со 100%-ным заполнением.

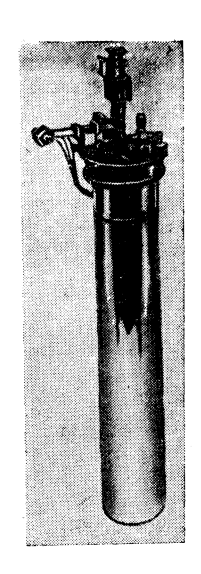


Рис. 15 Общий вид квантового усилителя трехсантиметрового диапазона.

На рис. 14 приведены примеры двух конструкций резонаторов: усилителя трехсантиметрового диапазона (рис. 14,*а*) с генератором накачки односантиметрового диапазона и усилителя двадцатисантиметрового диапазона (рис. 14,*б*) с генератором накачки трехсантиметрового диапазона Парамагнитный кристалл в резонаторе для работы в трехсантиметровом усилителе помещен вплотную к стенке волновода в пучность магнитных силовых линий полей сигнала накачки На частоте сигнала резонатор образован четвертьволновой полосковой линией и стенкой волновода. Резонатором на частоте накачки является отрезок волновода; его настройка производится при помощи поршня. Сигнал подводится по коаксиальной линии, и связь на частоте сигнала осуществляется петлей. Накачка подводится по волноводу, и связь с генератором накачки осуществляется щелью.

В связи с тем, что усиление в резонаторном КПУ носит регенеративный характер, эффективность таких усилителей обычно оценивают величиной произведения $\sqrt{K}\Delta f$, которое для данного кристалла и данного резонатора остается постоянным При увеличении усиления K уменьшается величина полосы пропускания Δf, и наоборот. Для того чтобы увеличить это произведение, нужно охлаждать усилитель до возможно низких температур (уже говорилось, что приходится работать при температуре жидкого гелия —4,2° К), брать наибольшую частоту накачки, подбирать парамагнитный кристалл с большим временем релаксации и большим числом спинов. Ве-

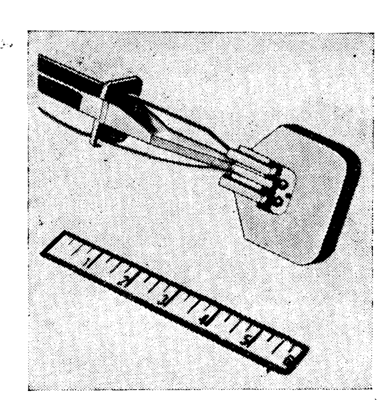


Рис. 16. Резонатор с постоянным магнитом квантового усилителя трехсантиметрового диапазона.

личина произведения $\sqrt{K}\,\Delta f$, которую удается достичь при охлаждении усилителя до температуры жидкого гелия, получается различной в разных диапазонах. Например, в дециметровом диапазоне это произведение имеет величину порядка 30 *Мгц*, а в сантиметровом диапазоне оно может иметь величину порядка 50—100 *Мгц*.

Полосы пропускания резонаторных усилителей с гелиевым охлаждением при усилениях порядка 20—25 *дб* составляют единицы мегагерц (до 7—8 *Мгц*).

На рис. 15 показан макет КПУ трехсантиметрового диапазона, разработанный в США, а на рис. 16 — резонатор этого усилителя с постоянным магнитом Это один из первых компактных усилителей. Произведение $\sqrt{K}\Delta f$ у него составляет 105 *Мгц*, а шумовая температура с неохлажденным циркулятором 25° К.

Полоса пропускания усилителя ограничивается главным образом резонатором (его добротностью), тогда как ширина резонансной линии парамагнитного кристалла намного больше (порядка 50—100 *Мгц*) полосы пропускания. Для резонаторного КПУ на рубине

$$\sqrt{K}\Delta f = 0{,}8\Delta f_{к},$$

где $\Delta f_{к}$ — полоса пропускания кристалла.

Во многих случаях требуются усилители со значительно более широкой, чем у однорезонаторного усилителя, полосой пропускания при большом коэффициенте усиления Однако в усилителях резонаторного типа при работе с большим коэффициентом усиления (т е при большой степени регенерации) стабильность усиления сильно ухудшается, коэффициент усиления меняется при незначительных изменениях мощности накачки, температуры и др.

Было найдено несколько путей увеличения полосы пропускания и стабильности усиления квантовых усилителей при сохранении относительно высокого коэффициента усиления. Один из них, предложенный советским ученым В. Б Штейншлейгером, состоит в использовании набора связанных между собой резонаторов с синхронной настройкой (рис. 17) или разделенных ферритовыми циркуляторами. Один из двухрезонаторных квантовых усилителей, разработанных в США, имел произведение усиления на полоску пропускания в 3,5 раза большее по сравнению с однорезонаторным усилителем. В Массачусетском технологическом институте (США) на одном из экспериментальных устройств в трехсантиметровом диапазоне с помощью вспомогательного резонатора без активного вещества, помещенного перед рабочим

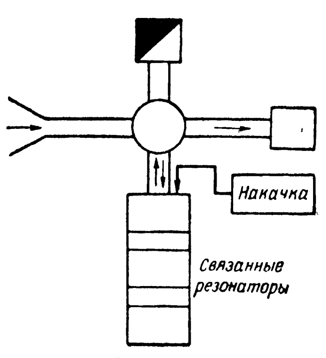


Рис. 17. Схема многорезонаторного квантового усилителя.

резонатором с рубиновым монокристаллом, была получена полоса пропускания порядка 40 *Мгц*. Однако такие системы не допускают перестройки усилителя по частоте или очень сильно затрудняют ее и значительно усложняют устройство усилителя. Другой путь состоит в увеличении времени взаимодействия сигнала с возбужденным парамагнитным веществом. Этот метод реализуется в квантовых усилителях бегущей волны

9. ПАРАМАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Квантовый парамагнитный усилитель бегущей волны представляет собой волновод с размещенным вдоль него активным веществом, по которому распространяются электромагнитные волны сигнала и накачки Поле накачки, воздействуя на активное вещество, возбуждает его, насыщая соответствующий переход, в результате чего образуется отрицательная температура между одной из пар энергетических уровней. Волна сигнала, распространяясь по волноводу, взаимодействует с парамагнетиком, вызывает индуцированное излучение и тем самым усиливается. Расчеты показали, что для получения заметного усиления длина волновода с парамагнитным веществом должна составлять несколько метров. Чтобы размеры КПУ имели приемлемые для практики размеры, применяют структуры, обеспечивающие замедление групповой скорости распространения волны сигнала вдоль волновода Чем медленнее распространяется волна, тем больше времени она взаимодействует с парамагнитным веществом и тем заметнее усиление.

Для того чтобы исключить отражения, вызванные рассогласованием входной и выходной линий, и получить однонаправленное усиление, активный материал располагают в структуре так, что он взаимодействует с полем сигнала только при одном направлении распространения волны, и, кроме того, вводят специальный элемент, поглощающий обратную волну и позволяющий получить однонаправленные потери.

Возможно применение замедляющих структур трех типов: геометрического, диэлектрического и резонансного. Вообще геометрические и резонансные замедляющие системы всегда используются в сочетании с диэлектрической системой, так как парамагнитный кристалл является диэлектриком.

К замедляющим системам первого типа относится хорошо известная проволочная спираль, применяемая в лампах бегущей и обратной волны Несмотря на то, что с помощью спирали можно получить большие замедления волны (в 100 раз) в широкой полосе частот, такая система в том виде, в каком она используется в лампах бегущей волны, не может найти применения в квантовых усилителях по той причине, что направление поляризации высокочастотного поля при распространении волны по круглой спирали перемещается вокруг ее оси, а это создает большие трудности в создании постоянного магнитного поля, перпендикулярного переменному полю Уплощенная же спираль, изображенная на рис. 18, позволяет получить нужную взаимную ориентацию плоскостей поляризации постоянного и переменного магнитных полей.

В структурах второго типа используется замедление в диэлектрике Замедление в такой структуре зависит от диэлектрической проницаемости ε диэлектрика и его размещения в линии

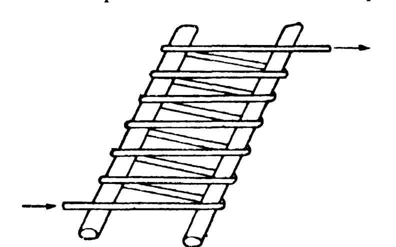


Рис. 18. Уплощенная спираль

Полоса пропускания диэлектрической замедляющей системы может быть одного порядка с полосой пропускания активного вещества или в несколько раз шире его резонансной линии. Удобны для применения в таких системах материалы с большой диэлектрической проницаемостью, например рубин (ε=11) и рутил (ε=89)

На рис 19 показана разработанная в США схема КПУ с диэлектрической замедляющей системой Эта система, состоящая из рутиловых полосок и полосок специального материала «стикаст», обеспечивает при замедлении, равном 14, в диапазоне 3—3,7 *см* полосу пропускания около 300 *Мгц*.

Периодические замедляющие структуры резонансного типа позволяют получать очень большие замедления волны (до 1 000 раз) в некоторой полосе, ограниченной верхней и нижней критическими частотами Было предложено довольно много различных резонансных замедляющих структур Одной из наиболее удобных замедляющих систем этого типа является гребенчатая система (рис. 20); такую систему в зависимости от конфигурации стержней называют также штыревой системой.

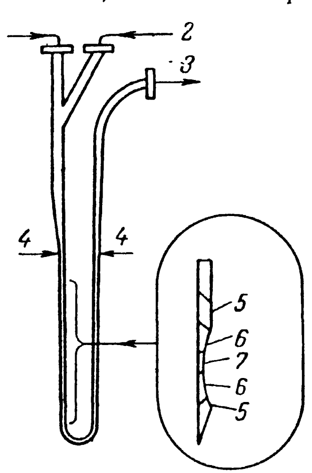


Рис 19 Схема квантового усилителя с диэлектрической замедляющей структурой.

1 — вход накачки; *2* — вход сигнала; *3* — выход сигнала; *4* — сужение; *5* — материал «стикаст»; *6* — рутил; *7* — активный материал (рутил с хромом).

Штыревая замедляющая система удобна тем, что с ней легко получить необходимую ориентацию постоянного и переменного магнитных полей. Постоянное магнитное поле прилагается в направлении штырей. Поле накачки в виде основной волны H_{10}, распространяясь в волноводе, образует сильное продольное магнитное поле у стенки волновода и сильное поперечное поле в его центре; при этом штыри не оказывают на эту волну большого влияния. По обе стороны гребенки образуются области круговой поляризации с противоположным направлением вращения; плоскость вращения круговой поляризации

перпендикулярна плоскости штырей Магнитное поле в случае гребенчатой структуры максимально у основания штырей.

Используя такую благоприятную ориентацию высокочастотных полей, можно поместить с одной стороны плоскости штырей активное вещество — парамагнитный кристалл, предназначенный для усиления прямой волны, а с другой стороны — элемент с не-

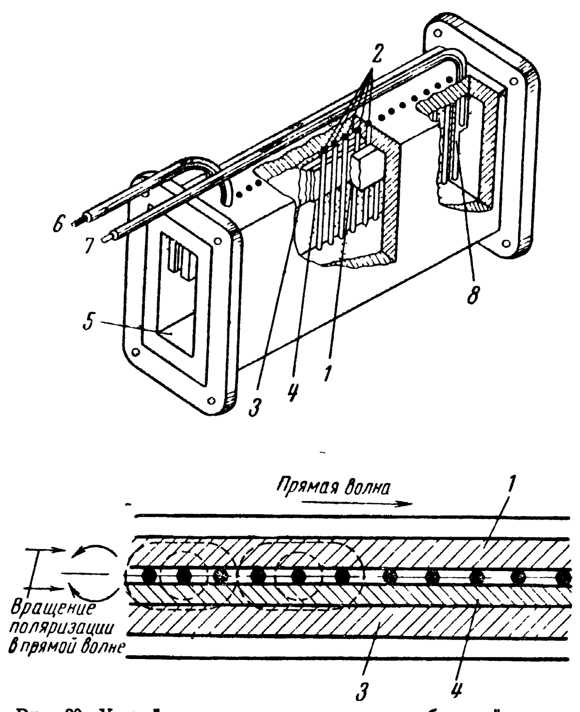


Рис. 20. Устройство квантового усилителя бегущей волны.
1 — розовый рубин; *2* — замедляющая система; *3* — красный рубин; *4* — прокладка из корунда; *5* — волновод накачки; *6* — вход сигнала; *7* — выход сигнала; *8* — элемент связи с коаксиальной системой.

взаимным затуханием — вентиль В качестве вентиля может быть использован тот же парамагнитный кристалл (например, рубин, но с большей концентрацией парамагнитных ионов) или специальный феррит. В случае использования парамагнитного вещества как для получения невзаимных потерь, так и для усиления поглощающий кристалл берется с такой концентрацией парамагнитных ионов, чтобы при выбранной мощности вспомогательного генератора не происходило насыщения по переходу накачки.

В волноводе с замедляющей системой и парамагнитными кристаллами прямая волна, имеющая круговую поляризацию

с левым вращением в верхней области (как показано внизу на рис 20) и с правым вращением в нижней, будет взаимодействовать с усиливающим кристаллом (розовым рубином), расположенным вверху, и не будет взаимодействовать с нижним кристаллом (красным рубином) Обратная волна, имеющая противоположное направление вращения круговой поляризации, будет сильно взаимодействовать с поглощающим и слабо—с усиливающим кристаллом. Кристалл с повышенной концентрацией (красный рубин) будет поглощать обратную волну, так как он не насыщен по переходу накачки. Таким образом, усиление получается только в прямом направлении. Недостатком такого вентиля является поглощение в нем значительной части мощности накачки.

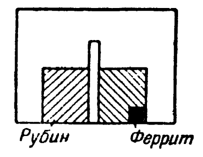


Рис. 21. Схема расположения кристаллов рубина и развязывающего феррита в усилителе бегущей волны.

Вместо парамагнетика для поглощения обратной волны может быть применен и специальный феррит, работающий при температуре жидкого гелия, причем объем ферритового стержня, при котором достигается необходимое поглощение, получается значительно меньшим, чем объем стержня из парамагнетика. Так, в одном из усилителей бегущей волны сантиметрового диапазона был успешно использован никель-цинковый феррит прямоугольной формы сечением 0,15×0,45 и длиной 8—12 *мм*. Такой феррит при температуре жидкого гелия и напряженности внешнего поля порядка $3 \cdot 10^5$ *а/м* имел вентильное отношение $B=10$ *, а обратное затухание составляло 70 *дб*. Расположение этого феррита в усилителе показано на рис. 21. Ферритовый вентиль благодаря большой ширине линии ферромагнитного резонанса при гелиевой температуре позволяет перестраивать усилитель изменением величины внешнего магнитного поля. Следует отметить, что такой вентиль очень слабо взаимодействует с полем накачки, что выгодно отличает его от парамагнитного кристалла аналогичного назначения.

Устройства КПУ бегущей волны с гребенчатой замедляющей системой и рубиновыми кристаллами показано на рис 20. В этой конструкции в отрезке волновода размещена штыревая замедляющая система У основания стержней закреплены парамагнитные кристаллы — усиливающий (розовый рубин) с концентрацией хрома примерно 0,05% и вентиль (красный рубин) с концентрацией хрома 1%. Для лучшей развязки вентиля от прямой волны между ним и штырями проложена пластина (прокладка) из чистого корунда. Вход и выход замедляющей системы по частоте сигнала в данной конструкции связаны коаксиальными линиями. Высокочастотная энергия генератора накачки подается непосредственно по волноводу.

---

* $B = \frac{\sigma_{обр}}{\sigma_{пр}}$, где $\sigma_{обр}$ — величина обратного затухания, а $\sigma_{пр}$—величина прямого затухания, *дб*.

Разработан также КПУ бегущей волны, в котором две пластины рубина, расположенные по обе стороны гребенки, являются усиливающими; для развязки входа и выхода в нем используется ферритовая пластина. Усиление такого усилителя существенно больше, чем усилителя с одним кристаллом, усиливающим волну только одного направления.

Следует обратить внимание на то, что для успешной работы усилителя бегущей волны не нужны элементы его настройки, такие как диафрагма связи и поршень. Не нужны также никакие внешние развязывающие устройства типа циркулятора, так как невзаимный элемент имеется внутри самого усилителя. Последнее обстоятельство делает усилители бегущей волны еще более малошумящими приборами, чем резонаторные квантовые усилители. Схема устройства квантового усилителя бегущей волны с постоянным магнитом показана на рис. 22.

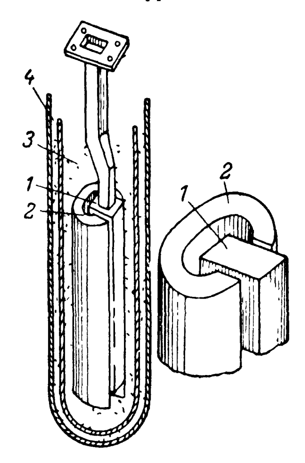


Рис 22. Схема устройства квантового усилителя бегущей волны с постоянным магнитом

1 — волновод; *2* — постоянный магнит, *3* — сосуд Дюара с жидким гелием; *4*—сосуд Дюара с жидким азотом.

КПУ бегущей волны по сравнению с резонаторными квантовыми усилителями обладают рядом преимуществ. Рассмотрим основные характеристики КПУ бегущей волны в сравнении с резонаторными усилителями.

В современных КПУ бегущей волны коэффициент усиления K в зависимости от назначения усилителя, типа активного вещества и других характеристик усилителя лежит в пределах 20—40 *дб* (100—10 000 раз по мощности).

Ширина полосы пропускания Δf усилителя бегущей волны получается на порядок больше, чем в резонаторном усилителе, и может достигать ширины линии парамагнитного резонанса активного вещества или даже большей величины. Напомним, что для рубина Δf примерно равно 75—100 *Мгц*. Если располагать активное вещество вдоль замедляющей системы в виде отдельных элементов со сдвигом настройки, т. е. для каждого такого участка создавать свое магнитное постоянное поле и подавать отдельно накачку, то можно в несколько раз расширить полосу пропускания усилителя.

Очень важным преимуществом усилителя бегущей волны является возможность его электронной перестройки изменением магнитного поля, изменением частоты накачки или изменением одновременно магнитного поля и частоты накачки. Первые усилители бегущей волны удавалось перестраивать на 200—600 *Мгц*. По мнению специалистов США, электронная перестройка квантовых усилителей бегущей волны возможна в сантиметровом диапазоне волн в пределах 1 000 *Мгц* и больше.

При больших усилениях, когда $K \geqslant 3$, для усилителя бегущей волны справедливо соотношение $\sqrt{K}\Delta f = \sqrt{3}\Delta f_к$ Величина произведения $\sqrt{K}\Delta f$ значительно превышает соответствующую величину для однорезонаторного КПУ; величина этого произведения определяется только шириной резонансной линии кристалла, т. е природой активного вещества, и растет при увеличении усиления.

Стабильность усиления у КПУ бегущей волны гораздо более высокая, чем у резонаторного усилителя, как при изменениях величины нагрузки и температуры активного вещества, так, особенно, при изменениях мощности генератора накачки Для увеличения стабильности желательно, чтобы мощность генератора накачки была достаточной для насыщения перехода на частоте накачки.

Уровень выходной мощности КПУ определяется объемом усиливающего материала. У усилителей бегущей волны этот объем во много раз больше (обычно раз в 10) и его выходная мощность также больше (в 10 раз), чем у резонаторных усилителей; существенно больше также динамический диапазон усиления

Первые КПУ бегущей волны сантиметрового диапазона, построенные в США в 1959 г, имели штыревые замедляющие системы В качестве активного вещества в одном из них использовался этилсульфат гадолиния с присадкой церия, а во втором — рубин. Первый усилитель оказался неудобным для практического применения из-за химической нестабильности этилсульфата гадолиния при комнатной температуре; усиление его было порядка 12 *дб* при полосе пропускания 30 *Мгц*. Во втором КПУ бегущей волны на диапазон волн 6—8 *см* (рис. 20) для усиления использовался кристалл рубина с концентрацией ионов хрома 0,1%, а вентилем в нем служил рубин с концентрацией хрома 2% Этот усилитель обладал коэффициентом усиления 23 *дб* и полосой пропускания 25 *Мгц*. Изменением магнитного поля от 313 694 до 324 044,5 *а/м* и частоты накачки от 18 900 до 19 500 *Мгц* усилитель перестраивался в диапазоне 350 *Мгц*.

10. ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Чрезвычайно важным параметром КПУ является уровень их собственных шумов До настоящего времени не известны усилительные приборы, которые имели бы столь малые собственные шумы Несмотря на то, что квантовые усилители пока еще несовершенны, сложны по устройству и не очень удобны в эксплуатации, целесообразность применения таких усилителей, как будет далее показано, полностью оправдывается исключительно низким уровнем их собственных шумов.

В начале предыдущей главы отмечалось, что предельная величина полезного сигнала, который может индицировать приемное устройство, зависит от уровня собственных шумов последнего. Шумы приемников и усилителей оценивают коэффициентом шума F. Коэффициент шума усилителя есть отношение пол-

ной мощности шумов на его выходе к шумовой выходной мощности, создаваемой подключением на входе идеального нешумящего усилителя активного сопротивления, находящегося при стандартной температуре 290° К, и показывает, во сколько раз реальный усилитель ухудшает отношение сигнала к шумам по мощности по сравнению с идеальным нешумящим усилителем. По определению коэффициенг шума всегда является безразмерной величиной и всегда больше единицы Идеальный усилитель имеет $F=1$. Часто коэффициент шума выражают в децибелах: F [*дб*]$=10 \lg F$.

Выше было сказано, что особое значение имеет величина коэффициента шума первого каскада усилителя приемника При большом коэффициенте усиления первого каскада полный коэффициент шума всего усилителя примерно равен коэффициенгу шума первого каскада.

Оценивать шумовые свойства малошумящих усилителей коэффициентом шума не всегда удобно. Принято характеризовать шумовые свойства малошумящих усилителей (квантовых, параметрических и др) так называемой температурой шума $T_ш$ (или шумовой температурой), выражаемой в градусах Кельвина. Температура шума $T_ш$ численно равна температуре источника сигнала (эквивалента антенны), подключение которого к входу усилителя приводит к удвоению мощности шумов на его выходе и является мерой интенсивности собственных шумов усилителя (приемника). Идеальный усилитель имеет шумовую температуру, равную 0° К.

Температура шума связана с коэффициентом шума следующим соотношением:

$$T_ш=(F-1)T_0,$$

где T_0 — стандартная абсолютная температура, равная 290° К.

Из этой формулы для коэффициента шума получаем:

$$F=\frac{T_ш}{T_0}+1.$$

В связи с тем, что коэффициент шума F часто дается в децибелах, выражение для шумовой температуры неудобно для расчетов, так как F входит в него в относительных единицах. Для значений коэффициента шума меньше 3 *дб* предложены приближенные формулы пересчета величины шумов в градусах Кельвина в коэффициент шума в децибелах и наоборот:

$$T_ш \approx \frac{600F\,[дб]}{9-F\,[дб]}; \qquad F\,[дб] \approx \frac{9T_ш}{600°\text{К}+T_ш}.$$

Забегая вперед, скажем, что шумы квантовых усилителей, да и современных приемников с КПУ (иногда даже с учетом шумов антенны и трактов) заведомо меньше 3 *дб* (300° К) и ошибки, получающиеся при расчетах по приведенным формулам, составляют не более 4%.

Источниками собственных шумов в квантовых усилителях являются тепловое излучение элементов усилителя и спонтанное

излучение частиц в парамагнитном кристалле при переходах с высшего уровня на низший на частоте сигнала. Проделанные расчеты и эксперименты показали, что собственные шумы резонаторного КПУ больше шумов усилителя бегущей волны.

Квантовые усилители работают при очень низких температурах, как правило, при температуре жидкого гелия, равной 4,2° К; в этих условиях тепловое излучение ничтожно мало и составляет единицы градусов Кельвина. Спонтанное излучение, как уже отмечалось, в диапазоне СВЧ мало, и шумовой вклад в общую величину шумов за счет спонтанного излучения невелик (также не превышает единиц градусов Кельвина).

Таким образом, собственные шумы современных трехуровневых КПУ ничтожно малы и составляют: для усилителей резонаторного типа 20—100° К, для усилителей бегущей волны менее 15° К.

Например, шумовая температура КПУ бегущей волны сантиметрового диапазона на рубине (рис. 20) $T_ш = 10{,}7 \pm 2{,}3°$ К, что соответствует коэффициенту шума $F = 1{,}037 \pm 0{,}008$. Для сравнения скажем, что температура шума очень хороших ламп бегущей волны в этом диапазоне составляет 500—800° К. В последнее время за рубежом ведутся интенсивные исследования по уменьшению собственных шумов ламп бегущей волны, приведшие к созданию экспериментальных образцов ламп с шумовой температурой в пределах 300° К.

11. НАСЫЩЕНИЕ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Одной из особенностей КПУ является их подверженность перегрузке при наличии на входе сильного сигнала.

При воздействии на усилитель мощного сигнала величина усиления резко падает, а после прекращения действия этого сигнала усиление восстанавливается до своего номинального значения только через некоторое время τ, называемое временем восстановления усиления. Перегрузка усилителя происходит вследствие насыщения, т. е. уравнивания под воздействием мощного сигнала населенностей энергетических уровней *3* и *2*, между которыми происходит индуцированное излучение (рис. 11); созданные накачкой избыточные частицы переводятся сигналом с уровня *3* на уровень *2* и усиление падает. Степень уменьшения усиления зависит от амплитуды сигнала и от его продолжительности. Максимальный уровень входного сигнала, при котором не происходит заметного насыщения усилителя, зависит от величины вероятностей релаксационных процессов, т. е. от природы кристалла.

Например, у резонаторных КПУ на рубине, работающих с охлаждением жидким гелием, уменьшение усиления начинается при сигналах, превышающих 10^{-9}—10^{-10} *вт*. Для усилителей бегущей волны эта величина значительно больше (порядка 10^{-7} *вт*). Кроме того, усиление их при увеличении мощности входного сигнала уменьшается менее резко Входная мощность, при которой усиление уменьшается вдвое по сравнению с номинальным значением, у КПУ бегущей волны на два порядка выше, чем у резонаторного усилителя При очень больших входных сигналах КПУ

бегущей волны просто пропускает этот сигнал, не усиливая, а только несколько ослабляя его — примерно на 3 *дб* (за счет начальных потерь в замедляющей системе и волноводе)

Как известно, многие из современных радиотехнических устройств, например радиолокационные станции, имеют общую антенну на прием и на передачу, и в каждой такой станции имеется антенный переключатель, защищающий вход приемника от мощного зондирующего сигнала. Однако через такой (обычно газоразрядный) переключатель просачивается мощность от 10^{-3} до 10^{-2} *вт*, которая вызывает насыщение усилителя После снятия насыщающего сигнала релаксационные процессы возвращают частицы с уровня *2* на уровень *1*, а уже оттуда поле накачки поднимает их на уровень *3* и снова создает состояние с отрицательной температурой по переходу сигнала. Практически можно считать усиление восстановленным, когда оно меньше максимального на 1 *дб*, т. е. $K = 0{,}9\,K_0$ По этому параметру КПУ бегущей волны также лучше резонаторного усилителя, так как при одинаковых T_1 и K_0 время восстановления усилителя бегущей волны меньше.

Время восстановления усиления для обычных усилителей на рубине составляет 0,01—0,1 *сек.* Это время соответствует минимальной дальности действия радиолокаторов в 1 500—15 000 *км**. Таким образом, сигналы, отраженные от объектов, находящихся на указанных дальностях и ближе, не будут усиливаться КПУ (или будут усилены слабо). Поэтому должны быть приняты меры по сохранению величины усиления. Существуют два пути устранения насыщения КПУ: первый — ослабить просачивающиеся мощные сигналы передатчика и другие сильные сигналы, т. е. попросту защитить квантовый усилитель; второй — уменьшить время восстановления усиления (время спин-решеточной релаксации T_1).

Защиту КПУ от сильных сигналов можно сравнительно легко осуществить, установив на его входе специальный коммутатор (переключатель) с малыми шумами и большим затуханием (не ниже 30—40 *дб*) или использовав для этого ферритовый циркулятор. Одна из первых конструкций переключателя показана на рис 23 Переключатель представляет собой отрезок волновода с ферритовым элементом (стержнем) и управляющей катушкой В момент излучения мощности передатчиком в управляющую катушку подается импульс тока, появляется постоянное магнитное поле, подмагничивающее феррит, что приводит к подавлению нормальной волны за счет поворачивания ферритом ее плоскости поляризации. Такой переключатель обеспечивает развязку более 30 *дб* в полосе 120 *Мгц* и без охлаждения имеет шумы 17° К. Используются также весьма эффективные полупроводниковые коммутаторы, охлаждаемые жидким гелием, практически не увеличивающие шумовую температуру усилителя.

---

* Дальность *Д* до объекта равна половине произведения (сигнал идет до объекта и обратно) времени распространения сигнала t на скорость распространения радиоволны c, т. е. $Д = \frac{tc}{2}$.

В одной из конструкций резонаторного КПУ трехсантиметрового диапазона для защиты от перегрузок использовался охлаждаемый циркулятор. Защита КПУ в этом случае осуществлялась переключением его входа в момент работы передатчика (путем изменения направления постоянного магнитного поля на противоположное) на согласованную нагрузку. Собственные шумы этого усилителя составляли всего 10° К.

Уменьшение времени спин-решеточной релаксации может быть достигнуто путем увеличения рабочей температуры усилителя и концентрации (до определенного значения) парамагнит-

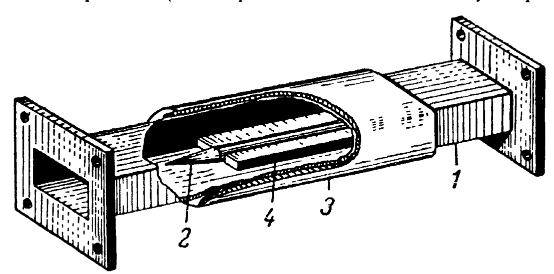


Рис. 23 Ферритовый переключатель для защиты квантовых усилителей от перегрузок.

1 — волновод; *2* — ферритовый стержень; *3* — управляющая катушка; *4* — медные ребра (для теплоотвода)

ных ионов в кристалле Однако при этом возрастает необходимая мощность генератора накачки и, кроме того, ухудшаются другие параметры усилителя (уменьшаются коэффициент усиления и полоса пропускания).

Исследования последнего времени показали, что могут быть синтезированы парамагнитные кристаллы с многокомпонентными примесями парамагнитных ионов, обеспечивающие очень малое время восстановления усилителей, при котором можно обойтись без специальных защитных устройств. В этом направлении сделано еще немного, и нужны упорные поиски как новых активных веществ, так и, возможно, новых, более эффективных методов их возбуждения.

Сравнение характеристик резонаторных КПУ и КПУ бегущей волны показывает, что усилители бегущей волны имеют существенные преимущества: прежде всего по величине полосы пропускания при большом коэффициенте усиления, возможности перестройки в относительно широком диапазоне и стабильности работы. Кроме того, в усилителях бегущей волны меньше источников собственных шумов, так как они не имеют циркуляторов. Таким образом, можно считать, что КПУ бегущей волны являются основным и наиболее перспективным типом квантовых парамагнитных усилителей. Конечно, не исключается возможность использования резонаторных усилителей в тех случаях, когда не требуется широкая полоса пропускания и перестройки по частоте.

12. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Магнитные системы. Постоянное магнитное поле, как уже указывалось, необходимо для получения расщепления энергетических уровней в парамагнитном веществе. В известных парамагнитных материалах для работы в диапазоне СВЧ желаемое расщепление достигается при напряженностях магнитного поля в несколько десятков тысяч ампер на метр. Направление магнитного поля в зависимости от его величины, природы активного вещества и выбранных частот сигнала и накачки может совпадать с оптической осью монокристалла, быть перпендикулярным этой оси или составлять с ней определенный угол. Для рубина, например, чтобы получить нужное расщепление уровней, часто берется угол между направлениями магнитного поля и оптической оси кристалла в 54,7°. Магнитная система должна обеспечивать однородность магнитного поля, ибо иначе рабочая частота не будет соответствовать резонансному значению, что вызовет нестабильность усиления.

В первых образцах КПУ использовались электромагниты или большие постоянные магниты. Такая магнитная система (рис. 12) размещалась с внешней стороны криостата, вследствие чего зазор между полюсами магнита получался большим. Для создания внутри усилителя неоднородного поля необходимой величины полюсные наконечники приходилось делать большими, и вся магнитная система получалась весьма громоздкой, тяжелой и неэкономичной. Вес первых магнитных систем составлял десятки и сотни килограммов. В последние годы были разработаны на основе специальных магнитных сплавов малогабаритные постоянные магниты, помещаемые внутрь криостата.

Перестройка квантовых усилителей с внутренним постоянным магнитом может производиться при помощи подвижных небольших постоянных магнитов, размещаемых снаружи криостата. На рис. 16 был показан резонатор квантового усилителя трехсантиметрового диапазона с постоянным магнитом, разработанный в США. Вес постоянных магнитов, помещаемых внутрь сосуда Дюара, лежит в пределах от сотен граммов до нескольких килограммов, что уже является вполне приемлемым даже для транспортабельной аппаратуры.

Очень важным для совершенствования техники квантовых усилителей является создание магнитных систем со сверхпроводящими обмотками. Эти устройства основаны на использовании явления сверхпроводимости — потере электрического сопротивления некоторых металлов и их соединений при охлаждении до температур, близких к абсолютному нулю.

В разработанных к настоящему времени сверхпроводящих магнитах используются металл ниобий или его сплавы с оловом, цирконием. Один из таких магнитов имеет обмотку из сверхпроводника, намотанную на полюсные наконечники, соединенные ярмом (рис. 24). Обмотка подключается к источнику тока и опускается в жидкий гелий. После установления необходимого магнитного потока источник отключается, а концы обмотки замыкаются накоротко. Так как обмотка в жидком гелии находится в сверхпроводящем состоянии и имеет нулевое сопротивление,

в ней будет циркулировать ток сверхпроводимости, создавая нужное магнитное поле.

Размеры и вес магнитов со сверхпроводящими обмотками меньше, чем у постоянных магнитов. Такие магниты позволяют получать поля высокой интенсивности и однородности. Важным преимуществом магнитных систем со сверхпроводником является возможность подстройки усилителя изменением постоянного магнитного поля. В квантовом усилителе миллиметрового диапазона одной из американских фирм использована магнитная система весом 2,3 *кг* с обмоткой из сплава ниобия и циркония в жидком гелии. Обмотка питается от источника напряжением 12 *в* и создает магнитное поле с индукцией 0,8 *тл*, неоднородность которого составляет $2 \cdot 10^{-4}$ в сферическом объеме диаметром 1,25 *см*. Отмечается, что в случае использования для получения поля такой же величины обычного электромагнита для его питания потребовалась бы мощность 3 *квт*, а вес его составлял бы 545 *кг*. Можно полагать, что в КПУ, работающих при температуре жидкого гелия, в основном будут применяться сверхпроводящие магниты.

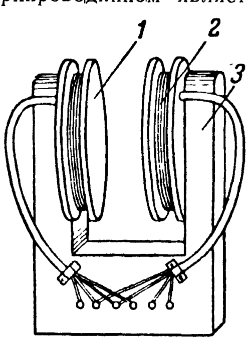


Рис 24. Магнитная система со сверхпроводящими обмотками

1 — полюсные наконечники, *2* — обмотка; *3*—ярмо

Системы охлаждения (криостаты). Для обеспечения приемлемых параметров КПУ должны работать при температурах, близких к абсолютному нулю. Необходимость применения криогенной техники является неприятной особенностью КПУ, существенно влияющей на их портативность и осложняющей их эксплуатацию. Первые лабораторные макеты квантовых усилителей охлаждались от температуры 1,25° К, что достигалось применением гелиевых криостатов с откачкой паров гелия.

В экспериментальных образцах КПУ часто для охлаждения активного вещества используются двойные сосуды Дюара, содержащие жидкий гелий и жидкий азот. Во внутренний сосуд, заполняемый жидким гелием, помещают резонатор или волновод квантового усилителя, а в последних конструкциях и магнитную систему. Наружный сосуд с жидким азотом служит тепловым экраном для уменьшения испаряемости жидкого гелия. Емкость гелиевых сосудов в среднем составляет 3—5, а азотных 5—7 *л*. Вначале сосуды Дюара изготовлялись из стекла, а впоследствие были разработаны компактные криостаты из нержавеющей стали, представляющие собой единую конструкцию из двух сосудов Дюара. Подводящие линии к резонатору или волноводу для уменьшения теплопроводности изготовляются из нержавеющей стали, мельхиора или из стекловолокна с позолотой внутри; для еще большего уменьшения теплопроводности волноводы могут иметь специальное пластмассовое наполнение.

На рис. 15 и 25 показаны криостаты, разработанные в США. Внутренний сосуд трехсантиметрового усилителя, показанного на рис 15, изготовлен из нержавеющей стали и имеет диаметр,

достаточный для помещения внутри сосуда постоянного магнита. Большая высота сосуда обеспечивает достаточное охлаждение подводящих линий из нержавеющей стали, соединяющих резонатор с входным фланцем Представленный на рис. 25 эскиз одного из первых макетов криостатов без наружного сосуда с азотом непроливающейся конструкции занимает объем 9,5 *дм³* и весит около 9 *кг*. Такая конструкция позволяет наклонять криостат в любое положение, что важно при размещении усилителя вместе с подвижной антенной на земле или при использовании этого криостата в бортовой аппаратуре.

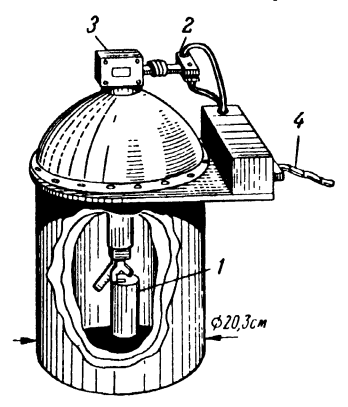


Рис. 25. Устройство криостата с квантовым усилителем.

1 — квантовый усилитель, циркулятор и магнит; *2* — генератор накачки на клистроне (λ=1,5 *см*); *3* — вход — выход; *4* — канал контроля мощности клистрона и поля магнита.

Криостаты с обычными сосудами Дюара должны наполняться гелием и азотом вследствие их испарения в лучшем случае 1 раз за 8—12 *ч*. Непроливающиеся криостаты закрытой конструкции требуют заливки хладоагентов 1 раз в несколько дней. Необходимость доставки и подачи криогенных жидкостей к антенне, где, как правило, устанавливается КПУ, а также периодическая заливка этих жидкостей в криостаты, которая сама по себе представляет довольно трудную процедуру, существенно затрудняют эксплуатацию парамагнитных усилителей. В значительной части действующей радиоэлектронной аппаратуры и особенно подвижной и бортовой квантовые усилители с заливными криостатами вообще нельзя использовать Освободиться от забот по доставке хладоагентов и частой заливке криогенной системы удалось путем применения специальных холодильных установок с замкнутым циклом, не требующих частой периодической заливки криогенных жидкостей.

Конструкция одной из самолетных установок с КПУ трехсантиметрового диапазона и криостатом с замкнутым циклом, разработанная одной из американских фирм, показана на рис. 26. Объем, занимаемый криостатом и сосудом Дюара этой установки, составляет примерно 37 *дм³*, а вес ее около 27 *кг*. На рис. 27 приведена фотография одного из первых экспериментальных макетов криостата с компрессором воздушного охлаждения, разработанного той же фирмой.

Интересно привести опубликованные в 1961 г. в американском журнале предполагаемые характеристики гелиевых установок с замкнутым циклом, ожидаемых, как сообщалось, в 1962—1963 гг. Для криостатов в наземных установках сообщались следующие данные: охлаждающая мощность при 4,2° К порядка 0,25—1 *вт*; размеры 85—285 *дм³*; вес 45—220 *кг*; по-

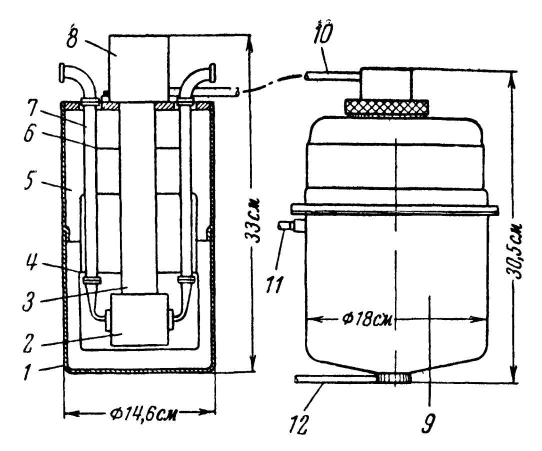


Рис. 26. Устройство квантового усилителя с холодильной установкой замкнутого цикла

1 — сосуд Дюара, *2* — квантовый усилитель. *3* — охлаждающая пластинка, *4* — тепловой экран, *5* — вакуум, *6* — тепловой шунт; *7* — волновод; *8* — поглотитель тепла охлаждающей пластины, *9* — компрессор; *10* — гелиевый канал, *11* и *12* — вход и выход водяного охлаждения

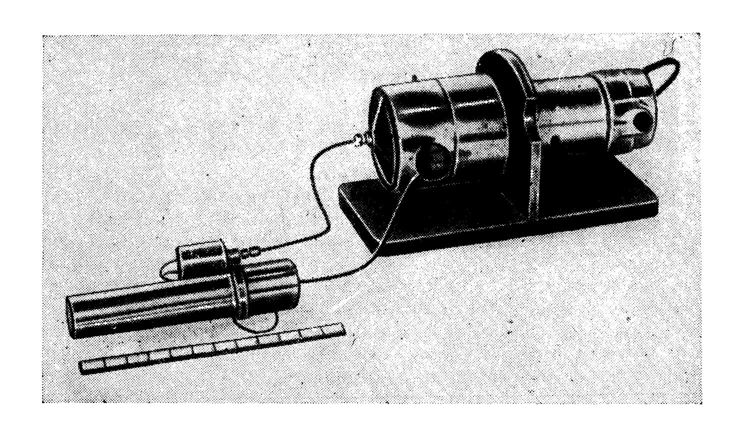


Рис 27 Макет криостата с замкнутым циклом

требляемая мощность 1—5 *квт*; срок службы (между профилактическими осмотрами) 1 000 *ч* (криостата) и 5 000—10 000 *ч* (компрессора). Для криостатов на самолетах и ракетах: охлаждающая мощность при 4,2° K порядка 0,25—0,5 *вт*; размеры 28,5 *дм*³; вес 16—22 *кг*; потребляемая мощность 1—2 *квт*; срок службы (между профилактическими осмотрами) 1 000 *ч*.

Следует отметить, что многие из указанных здесь параметров микрохолодильных установок с замкнутым циклом к настоящему времени уже превышены. Так, например, имеется сообщение о выпуске одной из американских фирм криостата для квантовых усилителей весом меньше 11 *кг* и потребляемой мощностью 1 *квт*.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОСВОЕНИЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

В настоящее время после успешного технического освоения длинноволновой части диапазона СВЧ, т. е. дециметровых и сантиметровых радиоволн, за рубежом очень широко ведутся научно-исследовательские и конструкторские работы по практическому освоению более коротких радиоволн—миллиметровых и субмиллиметровых. Напомним, что миллиметровыми волнами называются электромагнитные колебания с длиной волны от 1 *см* до 1 *мм*, а к субмиллиметровым волнам относятся колебания с длиной волны от 1 до 0,5 *мм* (500 *мк*). Заметим, что граница субмиллиметрового диапазона с инфракрасными лучами строго не установлена.

Огромное внимание, которое уделяется освоению новых диапазонов волн, и большие усилия, затрачиваемые на это, объясняются тем, что использование этих диапазонов позволяет получить более высокие технические и эксплуатационные характеристики радиоэлектронных устройств.

Серьезным недостатком миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов является сильное затухание (поглощение) излучений в атмосфере и значительный уровень шумов последней. Поэтому основное преимущество квантовых парамагнитных усилителей — их малые собственные шумы — при работе таких усилителей в земных условиях на этих диапазонах нельзя использовать. Между тем, в связи с успешным освоением космического пространства радиоволны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов приобретают особое значение и находят все большее применение для направленной радиосвязи между спутниками и космическими кораблями, для управления летательными аппаратами на больших высотах, в радиоастрономии, космической радиолокации и радионавигации.

КПУ, как уже говорилось, в принципе способны работать на очень высоких частотах, вплоть до оптических волн. В настоящее время они являются единственным перспективным классом приборов для усиления миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн и создания высокочувствительной приемной аппаратуры. Путей создания каких-либо других приборов со столь малым уровнем шума в этих диапазонах пока не найдено.

В длинноволновой части миллиметрового диапазона КПУ уже созданы. Так, например, в лаборатории Массачусетского технологического института (США) разработан КПУ на рубине с хромом (или железом) для работы в непрерывном режиме

в диапазоне 8,3—9 *мм* Накачка у этого усилителя подается на волне примерно 4,3 *мм*. Усилитель обеспечивает усиление 15 *дб*; произведение корня квадратного из коэффициента усиления на полосу пропускания составляет 10—40 *Мгц*.

Сообщалось, что в той же лаборатории разрабатывается радиолокационная станция миллиметрового диапазона, в которой будет использован КПУ. В Колумбийском университете (США) на рутиле с железом (0,12%) был разработан усилитель бегущей волны на диапазон 5,2—6 *мм*, настраиваемый изменением магнитного поля в пределах 0,72—0,55 *тл* при почти постоянном значении частоты генератора накачки (в пределах 0,5% λ от 3,8 до 3,84 *мм*) и мощности примерно 50 *мвт*. При охлаждении до 1,6° К было получено усиление 15—20 *дб* в полосе 15—20 *Мгц*. Температура шума КПУ миллиметрового диапазона может составлять 20—30° К, а величины усиления и полосы пропускания ожидаются примерно такие же, как у квантовых усилителей сантиметрового диапазона.

Исследования по созданию КПУ на более высокие частоты ведутся в двух направлениях: одно из них — изыскание новых активных материалов, а другое, главное, — разработка новых методов возбуждения, с помощью которых можно было бы получать в активном веществе с многими энергетическими уровнями отрицательные температуры при частоте вспомогательного генератора (генератора накачки) ниже частоты сигнала.

В настоящее время удалось построить усилители миллиметрового диапазона на ряде кристаллов, в том числе на кристаллах рубина с хромом и железом, фтористого кальция и рутила с хромом и железом. Ведутся исследования по выяснению пригодности для работы в миллиметровых квантовых усилителях и других материалов, например изумруда, окиси магния, вольфраматов.

Необходимость разработки новых методов возбуждения обусловлена тем, что в парамагнитных усилителях с использованием трех энергетических уровней при рабочей длине волны 3 *см* частота накачки обычно лежит в односантиметровом диапазоне, а для усилителей с длиной волны короче 1—1,5 *см* уже нужны источники накачки в диапазоне коротких миллиметровых и субмиллиметровых волн. Как известно, в этом диапазоне генераторов колебаний необходимой мощности (минимум десятки милливатт) пока не существует.

При одном из таких методов возбуждения выбирается вещество с четырьмя уровнями энергии. Энергия накачки (рис. 28) подается на частоте $f_н$, соответствующей переходу между уровнями *1—3* и *2—4*, причем частицы совершают переход с уровня *3* на уровень *2* без излучения. Затем поле накачки переводит их на уровень *4*, и уже переход с этого уровня на уровень *1* является сигнальным. Как видно из рис. 28, первый и третий уровни должны находиться на таком же расстоянии, как второй и четвертый; кроме того, разность энергий четвертого и первого уровней должна соответствовать частоте излучения, превышающей частоту накачки. С использованием такого метода работает созданный в США резонаторный КПУ на рубине с хромом и железом в диапазоне 2,6 *мм* при накачке на волне 4,2 *мм*.

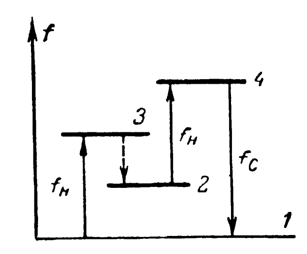


Рис 28 Схема возбуждения с использованием трех уровней и частоты накачки ниже частоты сигнала.

Для снижения частоты накачки может быть использовано и большее количество уровней Известно, например, о разработке в США для систем космической связи и радиолокационных станций экспериментального КПУ с использованием пяти уровней. Усилитель работает на волне 3,1 *мм* с накачкой на волне 4,6 *мм* и имеет при температуре 4,2° К усиление 10 *дб* и коэффициент шума 2 *дб* (шумовая температура примерно 170° К)

Отметим, что одним из перспективных путей разработки КПУ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов является изыскание материалов и простых способов, позволяющих усиливать колебания этих диапазонов при оптической накачке (и в том числе от некогерентных источников)

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

13. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Собственная шумовая температура очень хороших приемников СВЧ с обычными электронными усилительными приборами (лампы бегущей волны и лампы обратной волны) до появления малошумящих усилителей имела величину не ниже 1 000—1 500° К. При этом всеми внешними шумами, а также шумами антенно-волноводного тракта можно было пренебрегать С появлением КПУ, имеющих ничтожную величину собственных шумов, шумами внешних источников уже пренебрегать стало нельзя, так как они имеют существенное значение при определении общего порога чувствительности приемного устройства.

Полные шумы приемной системы, включая антенну, как известно, складываются из шумов самого приемника (их называют собственными шумами) и шумов антенны, поступающих на вход приемника. Шумы антенны обусловлены шумами, создаваемыми сопротивлением потерь самой антенны и антенно-волноводного тракта и внешними шумами, которые определяются шумами космического происхождения (космические шумы), шумами, обусловленными поглощением в атмосфере, и шумами, излучаемыми поверхностью Земли.

Шумы теплового излучения поверхности Земли в среднем составляют 250—300° К. Для ослабления этого шума главные лепестки антенн радиотехнических средств с квантовыми усилителями не должны быть направлены на Землю, а боковые и

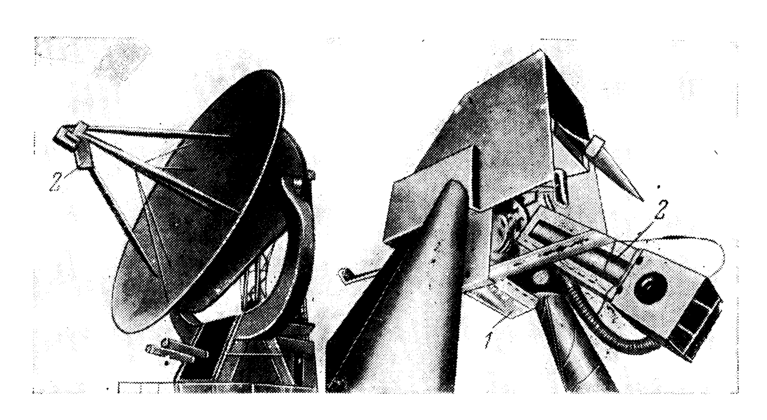


Рис 29 Антенна радиометра с квантовым усилителем (слева общий вид, а справа — облучатель с квантовым усилителем).
1 — рупорный облучатель; *2* — квантовый усилитель.

задние лепестки, по которым может приниматься шумовое излучение Земли, должны быть возможно сильнее подавлены.

Шумы атмосферы меняются в значительных пределах в зависимости от используемого дипазона волн, угла наклона антенны и метеорологических условий. Чем короче длина волны, тем сильнее шумы атмосферы. Так, для волны 3 *см* шумы атмосферы при вертикальной ориентации главного луча и при 100% влажности имеют 3—4° К, а при горизонтальной ориентации (угол возвышения 0°) шумы атмосферы достигают 30—40° К; на волне 8 *мм* при этих же условиях температуры шума соответственно равны примерно 30 и 300° К.

Космические шумы разделяются на шумы дискретных источников и непрерывно распределенное по небосводу излучение, называемое шумовым фоном Галактики. Из дискретных источников, называемых радиозвездами, практическое значение на СВЧ имеют только Солнце и Луна (а также Земля, если антенна из космоса направлена на нее). Влияние на температуру шумов антенны от излучения Солнца и Луны сильно меняется в зависимости от положения луча и величины боковых лепестков. Луна в зависимости от ее фазы дает шумы в пределах 150—240° К в широком диапазоне волн. Шумы Солнца изменяются в зависимости от длины волны и его состояния в широких пределах от 10 000° К (спокойное Солнце) до 1 000 000 000° К (возмущенное Солнце). В общем случае для остронаправленных антенн излучением дискретных источников можно пренебречь при условии, что их главный лепесток и ближайший к нему боковой не направлены на эти источники.

Шумовой фон Галактики зависит от частоты и ориентации антенны. Своего максимума эти шумы достигают, когда антенна направлена в центр Галактики, и уменьшаются с укорочением длины волны; в сантиметровом диапазоне волн шумовой фон Галактики не превышает единиц градусов Кельвина.

Шумы антенного устройства из-за потерь в самой антенне и всех элементах тракта (вращающихся сочленениях, волноводном тракте, переключателях), если не будет принято специальных мер по их уменьшению, могут значительно увеличить полные шумы приемного устройства. Известно, что каждые 0,1 *дб* потерь в таких трактах при нормальной окружающей температуре добавляют к другим шумам 7° К. Если учесть, что антенны современных радиоэлектронных средств имеют большие размеры, сложные облучатели и длинные тракты, задача по снижению шумов от всех элементов антенно-волноводного тракта является весьма серьезной и актуальной. Для решения этой задачи антенные системы конструируют с учетом использования КПУ с возможно короткими трактами и уменьшенными потерями во всех элементах антенной системы. Квантовый усилитель при этом обычно располагают вблизи точки питания антенны (рис. 29). В специальных радиотехнических установках, рассчитанных на использование малошумящих усилителей, шумовые температуры из-за потерь в элементах антенной системы составляют от 3 до 20° К.

Последние измерения и расчеты показывают, что внешние шумы наземных приемных систем в сантиметровом диапазоне волн при угле подъема антенны более 30° над горизонтом могут быть доведены до 10—20° К. Например, наземная приемная система, разработанная в США для спутника «Эхо», с квантовым парамагнитным усилителем в диапазоне 12,6 *см* и антенной диаметром 7 *м* (с очень малыми боковыми лепестками и уменьшенными потерями в элементах тракта) имела полную шумовую температуру всего приемного устройства 18—20° К при антенне, направленной в зенит, и менее 30° К при угле подъема антенны 12°.

14. УВЕЛИЧЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

С момента изобретения А. С. Поповым первого приемника электромагнитных колебаний ведется, если можно так сказать, непрерывная борьба за увеличение дальности действия радиотехнических средств. Увеличение их дальности действия достигается путем концентрации излучаемой энергии (применением остронаправленных антенн), повышением мощности передающих устройств, использованием методов оптимальной обработки принятых сигналов, а также повышением чувствительности приемных устройств.

Эти пути увеличения дальности действия радиотехнических средств, за исключением последнего, сопряжены со значительным усложнением аппаратуры, увеличением веса и габаритов этой аппаратуры и, в конечном счете, с существенным ее удорожанием. Кроме того, в ряде случаев при этом происходит снижение эксплуатационных характеристик радиосредств — ухудшение транспортабельности, увеличение времени готовности, снижение скорости обзора пространства (для радиолокационных станций) и т. п.

Наиболее экономически выгодный путь существенного увеличения дальности действия радиосредств заключается в повышении чувствительности приемных устройств. Последняя опре-

деляется минимальной (пороговой) мощностью радиосигнала в антенне, при которой возможно уверенное выделение этого сигнала на фоне шумов. Необходимо отметить, что прогресс в увеличении дальности действия радиосредств, свидетелями которого мы являемся, в значительной мере обусловлен повышением чувствительности приемных устройств.

До последних лет увеличение чувствительности приемников СВЧ шло по линии улучшения шумовых параметров смесительных диодов и ламп бегущей волны. Однако этим путем чувствительность приемников удалось улучшить примерно в 2 раза. И только с появлением полупроводниковых параметрических и квантовых парамагнитных усилителей открылись возможности повышения чувствительности приемных устройств СВЧ до практически предельных значений, ограничиваемых только внешними шумами. Так, например, выигрыш в чувствительности приемника от применения КПУ бегущей волны в одной из разработанных в США приемных систем в диапазоне 5—6 *см* составлял примерно 100 раз. Такой выигрыш в чувствительности не является максимальным и может быть увеличен при снижении полных шумов приемных систем.

Резкое повышение чувствительности приемников из-за снижения шумов позволяет получать существенно большие дальности действия радиотехнических средств. Первые испытания в США радиолокационных станций с КПУ на входе приемного устройства при шумовой температуре усилителей порядка 40—60° К и с обычными (не малошумящими) антеннами и трактами показали, что применение таких усилителей позволяет увеличить дальность действия этих станций в 2 раза.

Таблица 1

Примерная дальность действия системы слежения за спутниками (дальность односторонней связи) на волне 6 *см* при использовании различных типов приемников (диаметр антенны 80 *м*, мощность передатчика 0,1 *вт*)

Приемник	Шумовая температура приемника, °К	Полная шумовая температура системы, °К	Дальность действия, *км*
С кристаллическим смесителем	870	880	58 000
Параметрический усилитель (без охлаждения)	120	130	150 000
Современный квантовый усилитель	10	20	380 000
Перспективный квантовый усилитель (расчет)	2	12	490 000
Идеальный приемник	0	10	540 000

В табл. 1 и 2 приводятся зарубежные (США) данные примерной дальности действия наземной системы слежения за спутником и самолетного радиолокатора при использовании приемников с различными усилителями.

Таблица 2

Примерная дальность действия самолетного радиолокатора обнаружения на волне 3,2 *см* при использовании различных типов приемников (антенна на высоте 16 *км*, мощность передатчика 100 *квт*, отражающая поверхность цели 1 *м*²)

Приемник	Собственная шумовая температура приемника, °К	Шумовая температура приемника с учетом потерь в антенне и тракте, °К	Полная шумовая температура системы, °К	Дальность действия, *км*
С кристаллическим смесителем	870	999	1 066	38
Параметрический усилитель (без охлаждения)	120	166	223	106
Современный квантовый усилитель	10	44	111	127
Перспективный квантовый усилитель (расчет)	2	35	102	130
Идеальный приемник .	0	33	100	132

Как видно из таблиц, применение квантовых усилителей СВЧ позволяет увеличить дальность односторонней связи в 6 раз и дальность действия радиолокационной станции примерно в 3 раза по сравнению с дальностью, получаемой при использовании приемных устройств с кристаллическим смесителем. Следует заметить, что реальный выигрыш в дальности действия от применения КПУ может быть получен еще более значительным, чем это следует из приведенных данных.

15. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Области применения КПУ определяются их замечательной способностью работать с чрезвычайно малыми собственными шумами, что позволяет резко улучшить характеристики радиосредств различного назначения. С другой стороны, при применении таких усилителей должно учитываться влияние внешней среды, выигрыш будет значительно больше, если антенны вынести за пределы земной атмосферы.

КПУ могут успешно применяться и применяются прежде всего в системах исследования космического пространства. При радиоастрономических исследованиях с помощью радиотелескопов с квантовыми усилителями значительно расширяются доступные для наблюдения пределы вселенной. КПУ дают возможность обнаружить и исследовать все более далекие источники космического радиоизлучения, а также вести изучение

межзвездного вещества и планет солнечной системы. Они используются в системах управления и связи с исскуственными спутниками Земли и космическими кораблями, в телеметрической связи и системах космовидения, а также для радиолокации космических объектов с Земли (планет, спутников, космических ракет и кораблей).

КПУ могут найти применение в системах сверхдальней связи с помощью Луны и исскуственных спутников Земли, а также в системах связи, основанных на рассеянии радиоволн атмосферой и отражении от метеорных следов.

Кроме того, за рубежом, главным образом в США и Англии, квантовые парамагнитные усилители находят все более широкое применение в системах противоракетной обороны для обнаружения баллистических ракет и слежения за ними, а также наведения зенитных ракет, в установках слежения за снарядами, в том числе для слежения за возвращающимися в атмосферу ракетами, в радионавигационных системах, в комплексах управления самолетным оружием класса «воздух—воздух», в радиолокационных станциях дальнего обнаружения воздушных объектов и в системах военной спутниковой связи.

Весьма перспективно использование КПУ для усиления (и генерации) ультразвуковых колебаний, в физических (и химических) исследованиях при изучении природы и состава вещества методами радиоспектроскопии, в исследованиях парамагнитного резонанса и т. п.

Для иллюстрации областей применения квантовых усилителей приведем некоторые примеры практического их использования за рубежом и в СССР, а также наиболее интересные характеристики усилителей и приемных систем.

В США разработан радиометр с резонаторным КПУ трехсантиметрового диапазона с $\sqrt{K}\Delta f = 10$ и 50 *Мгц* при полосе пропускания $\Delta f = 5{,}5$ *Мгц* и $T_{ш} = 85°$ К. Все высокочастотные элементы радиометра, в том числе КПУ, местный гетеродин и усилитель промежуточной частоты, смонтированы в одном блоке, установленном в фокусе антенны. Этот радиометр еще в 1959 г. был успешно применен для исследования радиоизлучения Венеры и Юпитера, причем чувствительность его от применения квантового усилителя возросла в 12 раз.

В Мичиганском университете США с января 1960 г. находятся в эксплуатации радиотелескоп с диаметром зеркала антенны 26 *м*, в котором использован КПУ бегущей волны на длину волны 3,4 *см* с усилением порядка 20—30 *дб* в полосе 30 *Мгц*. Полная шумовая температура приемной системы этого радиотелескопа не выше 75° К.

Из примеров использования КПУ для исследования космического пространства весьма интересна работа Института радиотехники и электроники Академии наук СССР по применению резонаторного КПУ в радиолокаторе для изучения планет солнечной системы и космического пространства.

Усилитель для этой системы был построен в диапазоне примерно 40 *см* на рубине с концентрацией хрома 0,017%. При охлаждении жидким гелием ($T = 4{,}2°$ К) он имел $\sqrt{K}\Delta f \approx 1$ *Мгц*, температура шума приемной системы (без антенны) состав-

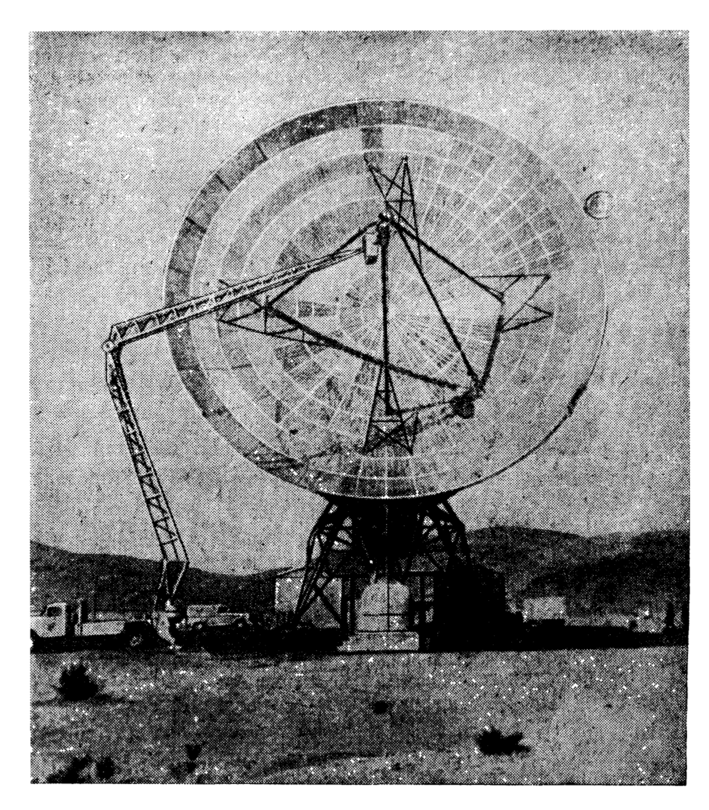


Рис 30. Антенна станции на полигоне в Голдстоне (США) с установленным квантовым усилителем.

ляла всего 20±10° К. Нестабильности усиления были устранены герметизацией резонатора. В связи с тем, что величина постоянного магнитного поля была выбрана небольшой (примерно 11 200 *а/м*), вес магнита, помещаемого вместе с резонатором в криостате, составил лишь 40 *г*, подстройка магнитного поля в пределах 4 000 *а/м* осуществлялась поворотом небольшого дополнительного магнита, расположенного снаружи криостата. КПУ размещался непосредственно на антенне и наклонялся вместе с ней; специальные криостаты позволяли наклон на ±45° от среднего положения и не требовали подлива гелия в течение 3 суток и азота в течение суток.

На этой установке в июне 1962 г. была осуществлена локация Меркурия, а с октября 1962 г. по январь 1963 г. успешно проводилось изучение Венеры. В один из сеансов впервые в мире была установлена радиотелеграфная связь через планету Венера: были переданы и приняты слова «Ленин», «СССР» и «Мир».

Квантовые усилители тридцатисантиметрового диапазона применены в системе космической радиосвязи и сопровождения, построенной в США в районе озера Голдстоун (рис. 30). Высокочастотные узлы этой системы также размещены непосредственно за отражателем антенны (диаметром 25,5 *м*). Малошумящие усилители внедрены также в действующую систему глобальной связи «Телестар». В этой системе, рассчитанной на 60 двусторонних телефонных каналов или на один телевизионный канал, связь осуществляется с помощью спутника «Телестар-1», запущенного на орбиту с высотой 1 100—6 000 *км*. В наземной системе связи со спутником «Телестар-1» используется ряд станций в США, Англии, Франции и др.

В США слежение и связь со спутником «Телестар» производятся с помощью наземного комплекса на полигоне Эндовер. Приемная система имеет КПУ бегущей волны сантиметрового диапазона (7,2 *см*) с усилением 25 *дб* в полосе 25 *Мгц* при охлаждении до минус 190° С. Полные шумы всей приемной системы составляют около 50° К и распределяются следующим образом: обтекатель—19° К; шум неба (при угле подъема антенны 7,5°) — 19° К; квантовый усилитель — 4° К; антенна — 2° К; волновод и дополнительные элементы усилителя — 7° К.

С использованием КПУ на рубине в системе слежения за космическими объектами, расположенной на полигоне в Голстоне (США), в 1962 г. удалось принять от космического зонда «Маринер-2» сигналы мощностью 10^{-18} *вт* (в пересчете к входу антенны). В 1961 г. с помощью этой системы была осуществлена передача сообщения в Австралию с использованием Луны в качестве ретранслятора сигналов. Сообщение на волне 31 *см* при мощности передатчика 7,5 *квт* прошло путь в 734 000 *км* за 2,5 *сек*.

Лабораторией Линкольна Массачусетского технологического института (США) сооружается радиолокационный комплекс, предназначенный для работы в системе глобальной связи вооруженных сил США, а также для проведения экспериментов по космической радиосвязи и по радиолокационному сопровождению космических объектов. В этом локаторе будут использоваться заменяемые приемопередающие комплекты с КПУ, помещаемые непосредственно вблизи зеркала антенны Разработанные для этого комплекса КПУ на волны 3,8 и 3,5 *см* имеют шумовую температуру не выше 20° К. Полная шумовая температура приемной системы не больше 75° К (ведутся работы по снижению шумовой температуры до 60° К). Охлаждение усилителей до температуры жидкого гелия обеспечивается криогенной установкой замкнутого цикла. В качестве иллюстрации высокой чувствительности системы указывается, что с помощью этого радиолокатора возможны слежение за снарядом калибра 0,22 на расстоянии 1 600 *км*, а также прием сигналов с шириной полосы 10 *гц* на расстоянии примерно 200 000 000 *км*.

Квантовые усилители находят за рубежом широкое применение и в радиолокационных комплексах противоракетной и противовоздушной обороны. Ряд станций американской системы противоракетной обороны «Ника-Зевс» испытан с такими усилителями. Колумбийским университетом совместно с Исследовательским центром армии США разработана радиолокаци-

онная система сверхдальнего обнаружения баллистических ракет с КПУ на входе приемной системы. С помощью этой системы баллистические ракеты можно обнаруживать на расстоянии 4 000 *км* (при максимальной высоте траектории ракеты 1 400 *м*), что опережает налет ракет на 15 *мин.* Американская радиолокационная станция слежения за управляемыми снарядами, работающая в диапазоне примерно 5 *см* и снабженная квантовым усилителем с полосой пропускания порядка 1 *Мгц*, при импульсной мощности передатчика в 1 *Мвт* имеет дальность действия 400 000 *км.*

Приведенные примеры показывают, что если еще совсем недавно использование квантовых усилителей было весьма ограничено и они встречались в отдельных опытных системах, где решающим фактором являлся сверхнизкий уровень шумов, то в последние годы такие усилители нашли за рубежом широкое применение в устройствах связи и системах вооружения.

16. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПАРАМАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Квантовая электроника является самой молодой областью радиоэлектроники, возникшей на базе успехов физики твердого тела, радиоспектроскопии и радиотехники. Квантовые парамагнитные усилители, представляющие один из многочисленных классов приборов, появившихся в результате бурного развития квантовой электроники, находятся пока еще в первоначальной стадии своего развития и совершенствования.

Главными проблемами развития квантовых усилителей всех диапазонов являются расширение их полосы пропускания при сохранении высокого коэффициента усиления и низкого уровня собственных шумов и изыскание методов, позволяющих получать столь же малый уровень шума, большие полосы пропускания и усиления при повышенных и даже комнатных температурах. С этой целью в настоящее время продолжается изучение известных кристаллов с различными парамагнитными примесями, исследование их радиоспектроскопических и ферромагнитных характеристик, переходов и релаксационных процессов в различных условиях. Рассматриваются также возможности синтеза новых материалов с одной или многими парамагнитными компонентами. Такими новыми материалами, может быть, станут полупроводники, органические вещества, полимеры, пластмассы и т п. Разрабатываются и новые способы возбуждения. Видимо, для этого возможно использование электрической компоненты СВЧ поля, ультразвуковых колебаний и др.

КПУ весьма перспективны для работы в миллиметровом, субмиллиметровом и более коротких диапазонах волн, так как все другие приборы работают в этих диапазонах с большими шумами. Для создания усилителей этих диапазонов нужно разработать новые методы возбуждения (в связи с укорочением длины волны генераторов накачки) и изыскать новые более эффективные материалы.

Для усовершенствования КПУ дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов необходимо расширить полосы

пропускания до сотен и тысяч мегагерц при больших коэффициентах усиления и низких шумовых температурах, а также изыскать простые способы перестройки усилителей в широкой полосе частот. Некоторые из возможных направлений для решения такой задачи нами уже упоминались (например, создание схем многорезонаторных усилителей и частных магнитных полей и собственной подкачки на отдельных участках усилителей бегущей волны, разработка новых парамагнитных и ферромагнитных материалов и замедляющих систем с одинаковым замедлением в большой полосе частот).

Совершенствование квантовых усилителей идет и в направлении снижения собственной шумовой температуры и температуры шума дополнительных элементов — циркуляторов, трактов переходных и защитных устройств (разрядников) от воздействия сильного сигнала. Для улучшения эксплуатационных характеристик усилителей должны разрабатываться более совершенные криостаты с замкнутым циклом и перестраиваемые магнитные системы со сверхпроводящими обмотками, в том числе на новых сверхпроводящих материалах, в которых явление сверхпроводимости возникает при более высоких температурах, чем гелиевые.

Существенными для развития квантовых усилителей являются разработка технологических методов получения больших парамагнитных монокристаллов с заданными свойствами и характеристиками (дозировка примесей, однородность по объему, оптическая однородность), методов прецезионной обработки таких кристаллов (снятие внутренних напряжений, определенная кристаллографическая ориентация, обработка с необходимыми геометрическими поверхностями), методов и аппаратуры для оптико-механического контроля образцов кристаллов, а также специальной измерительной аппаратуры, в частности, для измерения малых уровней шума.

Для реализации малошумящих свойств квантовых усилителей принимаются специальные меры по снижению потерь в антеннах и трактах и уменьшению шумов температуры последующих каскадов усилителя приемника. Хотя общая температура шума приемника и определяется в основном величиной шума первого каскада, но в связи с очень небольшой ее величиной шумы последующих каскадов усилителя существенно влияют на общие шумы.

В заключение скажем, что квантовые парамагнитные усилители уже на раннем этапе своего развития оказались незаменимыми приборами в установках исследования космического пространства и системах глобальной связи. Большой размах исследований в области квантовой электроники и в области квантовых усилителей СВЧ, в частности, дает основание рассчитывать, что эти усилители найдут широкое применение в самой различной аппаратуре, в том числе и у радиолюбителей.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

Глава первая. **Принципы действия квантовых приборов** 6

1. Сведения о квантовых системах 6
2. Усиление электромагнитных колебаний 12
3. Методы возбуждения квантовых систем 14
4. Усиление и генерация с использованием вспомогательного излучения 18

Глава вторая. **Принципы действия и устройство квантовых парамагнитных усилителей СВЧ** 21

5. Электронный парамагнитный резонанс 21
6. Принцип действия трехуровневых парамагнитных усилителей 28
7. Выбор парамагнитных кристаллов для квантовых усилителей 30

Глава третья. **Трехуровневые квантовые парамагнитные усилители** 32

8. Резонаторные парамагнитные усилители 33
9. Парамагнитные усилители бегущей волны 38
10. Шумовые свойства парамагнитных усилителей . . 43
11. Насыщение парамагнитных усилителей 45
12. Особенности устройства парамагнитных усилителей 48

Глава четвертая. **Освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов** 52

Глава пятая. **Применение и перспективы развития квантовых парамагнитных усилителей** . . . 54

13. Особенности использования парамагнитных усилителей 54
14. Увеличение дальности действия 56
15. Области применения парамагнитных усилителей . . 58
16. Перспективы развития парамагнитных усилителей 62

Цена 18 коп.